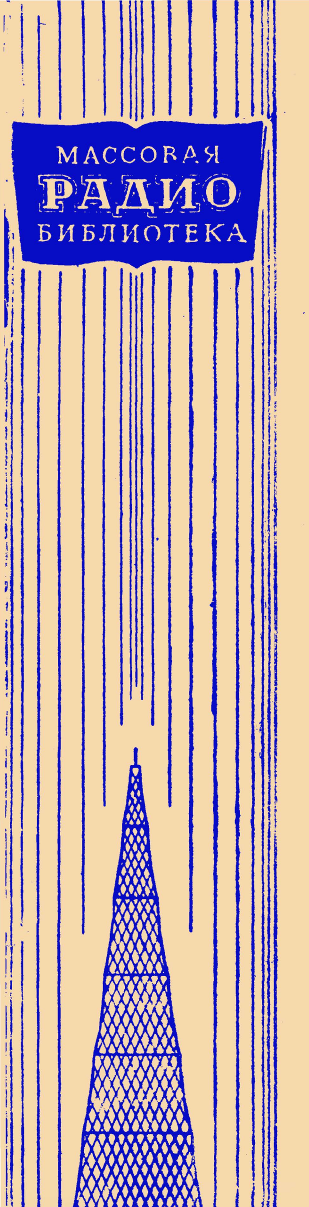


Л. П. КРАЙЗМЕР

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 293

Л. П. КРАЙЗМЕР

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

В брошюре популярно излагаются основные идеи кибернетики как науки об общих принципах управления. Приводятся основные сведения из теории информации, автоматического регулирования и электронных вычислительных машин. Рассматриваются возможности выполнения последними различных логических функций. Описывается значительное количество практических применений кибернетической техники как в области автоматизации управления, учета и планирования, так и в области моделирования физиологических процессов в живых организмах.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей и на широкие круги лиц, знакомых с радиоэлектроникой и интересующихся вопросами кибернетики. Для усвоения материала книги вполне достаточна общая подготовка в объеме средней школы.

Крайзмер Леонид Павлович
ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

Редактор *В. И. Шамшур* Техн. редактор *Л. Я. Медведев*

Сдано в пр-во 30/X 1957 г. Подписано к печати 25/II 1958 г.
Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 4,1 п. л. Уч.-изд. л. 4,5
Т-01532 Тираж 50 000 экз. Цена 1 р. 80 к. Заказ 522

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

„... усилить работы по конструированию и производству автоматических быстродействующих вычислительных машин для решения сложных математических задач и счетно-математических машин для автоматизации управления производственными процессами“.

(Из Директив XX съезда КПСС)

ВВЕДЕНИЕ

Наше поколение является свидетелем стремительного развития науки и техники. Самые смелые фантазии, еще недавно казавшиеся несбыточными мечтами, воплощаются в жизнь. За последние триста лет человечество прошло путь от простейших паровых машин до двигателей, работающих на атомной энергии, овладело сверхзвуковыми скоростями полета, достигающими нескольких тысяч километров в час. Люди поставили себе на службу энергию огромных рек, создали гигантские землеройные механизмы, заменяющие труд десятков тысяч землекопов. Запуском советских искусственных спутников Земли начался штурм космических пространств вселенной...

Созданы многочисленные приборы и аппаратура, повышающие остроту чувств человека. Современные оптические и электронные микроскопы позволяют все глубже проникать в тайны строения вещества, а мощные оптические и радиотелескопы дают нам новые и все более достоверные сведения о строении вселенной. Разнообразные совершеннейшие измерительные приборы дают возможность значительно более точного познания окружающего мира, чем это мог сделать человек, пользуясь только своими органами чувств. Мы научились слышать и видеть на огромных расстояниях, в воде, в темноте, за облаками, в толще металла и земной коры.

Сила человеческого гения не знает границ в познании и подчинении себе природы, в создании все новых и новых машин и аппаратов, облегчающих и заменяющих физический труд человека, колоссально увеличивающих силу его рук, делающих возможным передвижение с огромными скоростями, неизмеримо повышающих остроту его органов чувств.

Однако до самого последнего времени почти все даже наиболее совершенные механизмы и приборы предназначались для выполнения весьма разнообразных, но только

исполнительных функций. Их конструкция предусматривала всегда более или менее сложное управление, осуществляемое человеком, который должен оценивать внешнюю обстановку, внешние условия, наблюдать за ходом того или иного процесса и соответственно управлять машинами, движением транспорта и т. д. Область умственной деятельности, психики, сфера логических функций человеческого мозга, казалась до недавнего времени совершенно недоступной механизации.

Рисуя картины жизни будущего общества, авторы фантастических рассказов и повестей часто представляли дело так, что всю работу будут за человека выполнять машины, а роль человека будет сводиться лишь к тому, чтобы, наблюдая за работой этих машин, нажимать на пульте соответствующие кнопки, управляющие определенными операциями. Именно так, по сути дела, пользуясь современными средствами автоматики и телемеханики, управляет диспетчер с центрального пункта энергосистемой, включающей необслуживаемые электростанции. Так осуществляет руководство движением поездов и железнодорожный диспетчер на участке, оборудованном так называемой диспетчерской централизацией.

Однако современный уровень развития радиоэлектроники позволяет ученым и инженерам ставить и разрешать новые задачи создания устройств, «нажимающих кнопки», которые освободили бы человека от необходимости следить за производственным процессом и управлять им, т. е. заменили бы собой оператора, диспетчера. Появился новый класс машин — управляющие машины, которые могут выполнять самые разнообразные и часто весьма сложные задачи управления производственными процессами, движением транспорта, водить суда, пилотировать самолеты и т. д. Создание управляющих машин позволяет перейти от автоматизации отдельных станков и агрегатов к комплексной автоматизации конвейеров, цехов, целых заводов, что в свою очередь создает возможность нового невиданного роста производительности труда и расширения производства материальных благ для удовлетворения растущих потребностей людей — строителей коммунистического общества.

Теория различных управляющих устройств, точнее говоря общая математическая теория управления в самом широком смысле слова, оформившаяся за последнее десятилетие в новое самостоятельное научное направление, получила название кибернетики. Слово кибернетика происходит от

греческого слова «кибернетес», что означает «рулевой», «управляющий движением». От того же корня происходит, кстати, и латинское слово «губернатор» — «управитель». Придумано было слово кибернетика более ста лет назад известным французским ученым Ампером. Он попытался в книге, изданной в 1843 году, дать общую классификацию наук, в которой назвал кибернетикой не существовавшую тогда науку об управлении.

Впоследствии это название было забыто и вновь появилось около десяти лет назад, после того как в результате многолетней большой работы ученых многих стран и в том числе русских и советских ученых И. А. Вышнеградского, А. М. Ляпунова, А. А. Андронова, В. С. Кулебакина, В. А. Котельникова и других была подготовлена база для создания обобщающей науки об общих принципах управления. В ее современном виде кибернетика как новое научное направление была оформлена известным американским ученым, профессором математики Колумбийского университета Норбертом Винером. В годы второй мировой войны Винер был привлечен к математической разработке проблем теории зенитных стрельб, управления реактивными снарядами, электронных вычислительных машин. Столкнувшись с различными управляющими электронными схемами, Винер пришел к выводу о существенном сходстве процессов управления и передачи сигналов в технических устройствах и в живых организмах. Для более глубокого изучения этих аналогий Винер перешел на работу в физиологический институт в городе Мексико, где особо интересовался вопросами физиологии высшей нервной деятельности.

Результатом синтеза знаний математики, радиоэлектроники и физиологии явилась разработанная Винером общая теория управления, названная им кибернетикой и изложенная в написанных им двух книгах. Первая книга вышла в 1948 году под названием «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине». Вторая, популярного характера, выпущенная в 1951 году, носит название «Человеческое использование человеческих существ». Основной идеей, развиваемой автором в этих книгах, является идея о значительной общности между процессами управления в технических устройствах и в живых организмах. Наличие такой общности позволяет в ряде случаев описывать эти качественно отличные процессы одними и теми же системами математических уравнений. Необходимость совместного изучения процессов управления в технических устрой-

ствах и живых организмах определяется все более широким применением управляющих машин, заменяющих собой человека. А это в свою очередь требует тщательного изучения человеческого организма, его возможностей и ограничений с тем, чтобы создавать управляющие машины, которым можно было бы поручать все более сложные функции оператора и которые смогли бы выполнять эти функции быстрее и безошибочнее, чем человек.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ КИБЕРНЕТИКИ

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ

Как уже сказано во введении, характерной чертой кибернетики является совместное изучение процессов управления в технических устройствах и в живых организмах. Что же дает нам право сравнивать процессы управления в столь отличающихся качественно друг от друга системах?

Чтобы установить наличие позволяющих это делать аналогий, рассмотрим несколько общих блок-схем управления, относящихся к различным системам. На рис. 1 представлена схема неавтоматического управления каким-либо объектом (станком, конвейером, цехом, заводом, транспортной единицей и т. д.), осуществляемого человеком (оператором, машинистом, диспетчером, начальником), именуемым в дальнейшем руководителем.

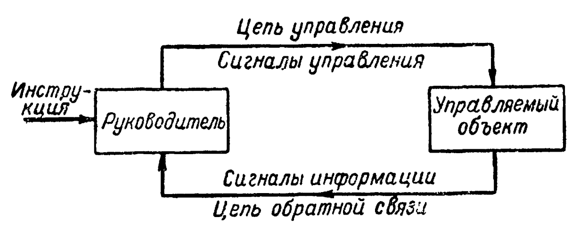


Рис. 1. Блок-схема неавтоматического управления объектом.

Воздействие руководителя на управляемый объект может осуществляться: механическим путем — при помощи рычагов или гибких тяг, гидравлического или пневматического привода; электрическим путем — изменением подводимых токов и напряжений или изменением частоты переменных токов, серий электрических импульсов и т. д.; при помощи устных распоряжений — по телефону или по любому другому каналу связи, если управляемый объект, как, например, цех, конвейер или завод, имеет исполнителей, управляющих агрегатами в соответствии с волей руководи-

теля. Все перечисленные и многие другие возможные средства передачи сигналов управления образуют цепь управления объектом или прямую цепь воздействия на управляемый объект. Однако совершенно естественно, что целесообразное управление объектом невозможно, если руководитель не знает состояния объекта, не имеет возможности лично, при помощи приборов или через исполнителей контролировать периодически или непрерывно фактическое состояние объекта и выполнение команд управления. Руководитель должен получать по так называемому каналу обратной связи информацию о фактическом поведении управляемого объекта, сравнивать ее с требуемым режимом работы, принимать соответствущие решения и посылать по цепи управления соответствующие сигналы (информацию) управления.

Рассмотрим конкретные примеры неавтоматического управления объектом.

Пусть задачей оператора (руководителя) является поддерживать постоянной и равной 1 500 оборотов в минуту скорость вращения электродвигателя постоянного тока, вращающего некоторое устройство (объект). Согласно паспортным данным, такая скорость вращения получается при определенных значениях напряжения питания и тока в обмотке возбуждения.

Однако в силу ряда трудно учитываемых обстоятельств, как, например, изменение нагрузки, трения в подшипниках, изменение окружающей температуры и связанное с этим изменение сопротивления обмоток и т. д., фактическая скорость вращения может не соответствовать заданной. Эта скорость должна быть измерена любым способом, например тахометром, и данные измерения должны стать известными оператору. Данные о скорости, измеренные приборами, передаются оператору по каналу обратной связи. Зная, таким образом, фактическую скорость вращения мотора, составляющую, скажем, 1 480 *об/мин*, и сравнивая ее мысленно с заданной скоростью 1 500 *об/мин*, оператор, руководствуясь инструкцией и практическим опытом, принимает решение изменить соответственно при помощи реостата величину тока возбуждения. Если в результате этого скорость двигателя превысит заданную, то изменением тока возбуждения в противоположную сторону можно уменьшить эту скорость.

В качестве другого, более сложного примера рассмотрим управление заводом (объект), осуществляемое диспет-

чером (руководитель). По каналам управления, связывающим диспетчера с цехами, он отдает распоряжения подчиненным ему исполнителям, получая от них в свою очередь по каналам обратной связи информацию о положении в цехах, снабжении сырьем, выпуске готовой продукции и т. д. На основе полученной информации диспетчер принимает определенные решения и отдает те или иные распоряжения (сигналы управления). Однако в случае такого косвенного управления производственным процессом — через мастеров цеха, исполнителей у станков и агрегатов и других посредников, — с одной стороны, повышается возможность искажения сигналов управления этими посредниками, но, с другой, ход производственного процесса может быть улучшен благодаря тому, что посредники выполняют волю диспетчера не механически, а могут ее творчески перерабатывать, внося те или иные коррективы в общие указания руководителя.

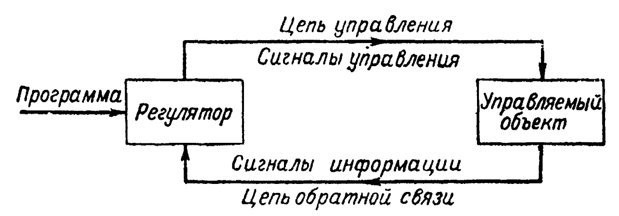


Рис. 2. Блок-схема автоматического управления.

На рис. 2 представлена схема автоматического управления объектом. Схема, как видим, не отличается от предшествующей, однако процесс управления осуществляется в данном случае без участия человека. От управляемого объекта через посредство не показанных на схеме измерительных приборов и преобразователей информация о состоянии управляемого объекта по цепи обратной связи поступает в регулятор и перерабатывается в нем так, что в соответствии с полученной информацией и заданной программой регулятор вырабатывает сигналы управления, поступающие по цепи управления к объекту. Программа регулирования может определяться самой конструкцией регулятора или в более сложных системах может вводиться в регулятор извне, как это будет описано ниже, в главе 3.

В качестве примера автоматического регулирования рассмотрим общеизвестную конструкцию центробежного регулятора паровой машины, изобретенного Уаттом в 1784 году

(рис. 3). Система работает следующим образом. С осью машины O_1 при помощи шестеренок $Ш_1$ и $Ш_2$ связана ось регулятора O_2, муфта которого M благодаря упругости работающей на сжатие пружины $П$ при неподвижной машине находится в крайнем нижнем положении. При увеличении скорости вращения машины грузы $Гр$ под действием центробежной силы отходят от оси O_2, сжимают пружину $П$ и поднимают муфту M. При этом перемещаются рычаги P_1 и P_2 и заслонка $З$ уменьшает поступление пара в цилиндры машины, отчего снижается число ее оборотов. Рассмотренная система полностью соответствует общей схеме автоматического управления (рис. 2), причем управляемым объектом здесь является паровая машина; цепь обратной связи, доставляющая к регулятору информацию о скорости вращения паровой машины, состоит из системы осей O_1 и O_2 и шестерен $Ш_1$ и $Ш_2$, а цепь управления образуется рычагами P_1 и P_2.

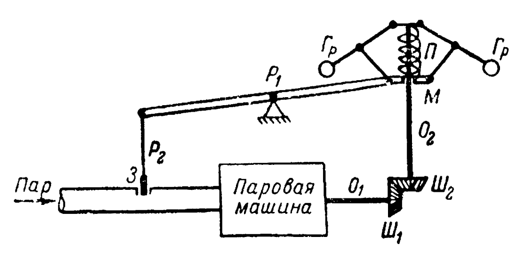


Рис. 3. Схема работы центробежного регулятора паровой машины.

Таким образом, каналы связи в рассмотренной системе имеют чисто механическую структуру.

Программа регулирования (заданная скорость вращения машины и пределы ее отклонения) зависит от конструкции самого регулятора, массы грузов $Гр$ и упругости пружины $П$, а также от характеристик цепей управления и обратной связи, т. е. соотношения плеч рычагов, передаточного числа зубчатого сцепления и т. д. Регулятор в этой системе, заменяя человека, выполняет простейшую логическую функцию, которая может быть выражена в следующем виде: «Если скорость машины велика, то нужно уменьшить впуск пара; если скорость мала, то впуск пара нужно увеличить».

В более сложных современных системах автоматического регулирования, когда управляемый объект включает несколько агрегатов или регулирование происходит не по одному параметру, а по нескольким (например, скорость,

температура, давление и т. д.), в качестве каналов связи, как правило, используются электрические цепи, а в качестве наиболее совершенных регуляторов, способных выполнять достаточно сложные и разнообразные логические функции, применяются электронные вычислительные машины (см. гл. 2 и 3).

Рассмотрим теперь систему управления, действующую в живом организме. По учению великого русского физиолога И. П. Павлова, «животный организм как система существует среди окружающей природы только благодаря непрерывному уравновешиванию этой системы с внешней средой, т. е. благодаря определенным реакциям живой системы на попадающие на нее извне раздражения, что у более высших животных осуществляется преимущественно при помощи нервной системы в виде рефлексов»[1]. Путь, по которому

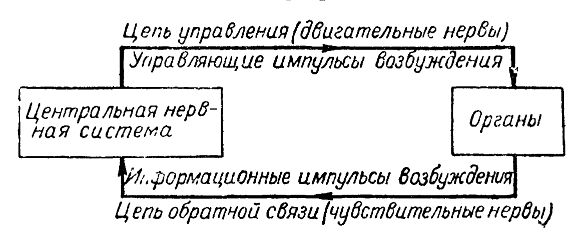


Рис. 4. Блок-схема рефлекторной дуги в живом организме.

осуществляется рефлекс, получил в физиологии название рефлекторной дуги. Блок-схема рефлекторной дуги представлена на рис. 4. Дуга состоит не менее чем из двух нервных путей: чувствительного и двигательного, связывающих центральную нервную систему (спинной и головной мозг), выполняющую функцию регулятора, с органами живого организма, являющимися управляемыми объектами. Рефлекторная дуга начинается с расположенных в управляемом органе рецепторов — воспринимающих раздражения окончаний чувствительных нервов. Если воспользоваться технической терминологией, то рецепторы выполняют роль измерительных приборов. По месту расположения рецепторы разделяются на внешние (экстерорецепторы), находящиеся в коже, ушах, глазах и т. д., и внутренние (интерорецепторы) — во внутренних органах, сосудах, мышцах. На действие того или иного раздражителя (свет, звук, тепло и т. д.) рецептор отвечает возникновением возбуждения,

[1] И. П. Павлов, Полное собрание сочинений, т. III, кн. 2, Академия наук СССР, 1951, стр. 323.

которое по каналу обратной связи — по чувствительным нервам — распространяется до центральной нервной системы и таким образом доносит до нее информацию о воздействии раздражителя на орган. В центральной нервной системе происходит переработка полученной информации. В простейшем случае это просто переход возбуждения на двигательные нервы. Это происходит, например, в спинном мозге при безусловном коленном рефлексе, заключающемся в подбрасывании ноги при ударе молоточком по коленной чашечке (рис. 5). В более сложных случаях при условных рефлексах дуга замыкается через временные связи, образующиеся в коре больших полушарий головного мозга. От центральной нервной системы процесс возбуждения по каналу связи — двигательным нервам — распространяется к рабочим органам — мышцам, железам, вызывая их деятельность.

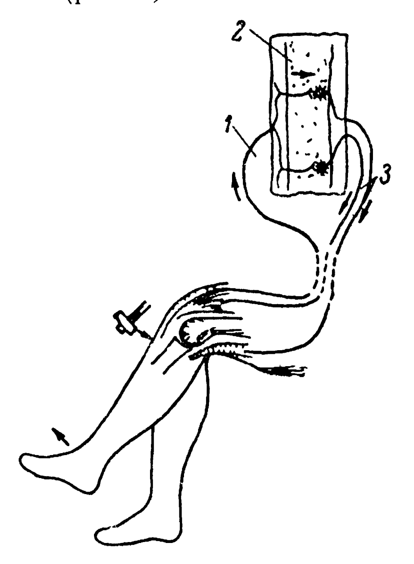


Рис. 5. Схема рефлекторной дуги коленного рефлекса.

1 — центростремительные или чувствительные нервы; *2* — спинной мозг, *3* — центробежные или двигательные нервы

Сравнивая теперь рассмотренные нами три блок-схемы управления (рис. 1, 2 и 4), относящиеся к неавтоматическому управлению, автоматическому управлению в технических устройствах и управлению в живых организмах, мы приходим к выводу о существенном структурном сходстве этих схем и о соответствии отношений между аналогичными элементами в различных системах.

Прежде всего все рассмотренные схемы управления характеризуются наличием замкнутого цикла, замкнутой кольцевой цепи передачи сигналов или, как в настоящее время все чаще говорят, передачи информации. С одной стороны, от регулятора к управляемому объекту по цепи управления поступает информация в виде сигналов управления, с другой стороны, от объекта к регулятору цепь передачи замыкается сигналами обратной связи, несущими информацию о действительном состоянии управляемого

объекта. Под каналами связи, передающими информацию, следует понимать любую систему, способную осуществлять такую передачу: механические, пневматические, электрические и другие каналы в технических устройствах и нервные коммуникации в живых организмах.

Роль руководителя в неавтоматических системах управления заключается в переработке получаемой информации о состоянии управляемого объекта, осмысливании этой информации и выработке наилучших, наиболее целесообразных решений по управлению объектом. В системах автоматического управления роль человека передается регулятору, который на основании полученной информации как бы должен принимать соответствующее «решение»[1]. Вместо человека теперь регулятор должен выполнять определенные «логические» функции, характеризующиеся формулой «если..., то...» (если получена такая-то информация, то нужно оказать на управляемый объект такое-то воздействие). Роль регулятора принадлежит и органам центральной нервной системы в живых организмах.

Рассмотрение приведенных выше схем управления позволяет сделать вывод, что кибернетика как математическая наука об управлении в самом широком смысле слова включает следующие основные разделы.

1. Теория систем автоматического регулирования, причем основное внимание кибернетика уделяет роли обратных связей как в технических устройствах, так и в живых организмах.

2. Теория информации, рассматривающая вопросы передачи информации по разнообразным каналам связи, включая нервную систему живых организмов, и переработку информации в регуляторах, в том числе и в органах центральной нервной системы живых организмов.

3. Теория регуляторов с точки зрения способности их к выполнению определенных логических функций. Практически в настоящее время в качестве наиболее совершенных регуляторов, допускающих сравнение с функциями органов центральной нервной системы живых организмов и человека, применяются быстродействующие электронные вычисли-

---

[1] Здесь и всюду в дальнейшем нужно помнить, что применение подобной антропоморфной (человекоподобной) терминологии в отношении машин чисто условно и служит для упрощения изложения. Фактически машины, конечно, не „принимают решений“, не „думают“, не обладают „памятью“ в обычном понимании этого слова и т. д.

тельные машины. Поэтому кибернетика рассматривает теорию этих машин и в первую очередь теорию выполнения ими логических процессов, подобных процессам человеческого мышления.

Математическим аппаратом кибернетики являются теория вероятностей, теория функций, математическая логика.

Теория и использование электронных вычислительных машин рассмотрены в главах 2 и 3. Ниже приводятся элементарные сведения из теории автоматического регулирования, а также основные понятия из теории информации.

2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

В предыдущем параграфе мы рассмотрели блок-схему простейшей системы автоматического регулирования, которая характеризуется наличием замкнутого цикла передачи информации. Вообще автоматическим регулированием называют автоматическое управление по замкнутому циклу. Назначением систем автоматического регулирования является поддержание заданного режима работы того или иного агрегата или транспортного объекта без участия человека. Таким образом, обеспечивается полная автоматизация управления работой системы, а роль человека сводится к монтажу и к первоначальной настройке, а также к пуску системы. Впрочем, и пуск может осуществляться автоматически в зависимости от определенных внешних условий.

Различают несколько видов управления по замкнутому циклу: стабилизирующее, следящее и программное. При стабилизирующем регулировании выполняется задача поддержания какого-либо параметра процесса постоянным. Рассмотренный выше центробежный регулятор паровой машины представляет собой одну из первых систем стабилизирующего регулирования. Стабилизирующие системы находят себе широкое применение для поддержания постоянства скорости, давления, температуры, напряжения, величины тока и т. д. В радиотехнической практике, например, широко применяются такие стабилизирующие устройства, как различные стабилизаторы тока и напряжения питания, автоматическая регулировка усиления в приемниках, обеспечивающая относительное постоянство напряжения на выходе приемника при значительных изменениях напряжения на входе; компрессоры в модуляционных устройствах, обеспечивающие относительное постоянство коэффициента модуляции при значительных колебаниях модулирующего напряжения; устройства стабилизации частоты и другие.

При следящем регулировании значение регулируемого параметра изменяется в зависимости от какого-либо другого параметра, вводимого извне или характеризующего протекание того же самого процесса. Следящие системы широко применяются для дистанционного управления различными объектами, когда, например, поворот рукоятки на некоторый угол вызывает поворот на такой же угол вала или руля, и в телеизмерениях, когда, например, перемещение измеряемого объекта вызывает соответствующее перемещение стрелки измерительного прибора. Такие следящие системы, у которых входная и выходная величины представляют собой механические перемещения, называют иногда сервомеханизмами. Примерами применения следящих систем в радиотехнической практике являются устройства автоподстройки приемников, радиолокационные системы сопровождения самолетов и др.

Программное регулирование представляет собой такую систему, при которой значения регулируемых параметров автоматически изменяются во времени в соответствии с заложенной в регулятор программой. Однако и в этом случае роль обратных связей не снижается, ибо остается необходимость контроля за тем, как управляемый объект фактически реагирует на сигналы управления, а следовательно, и необходимость корректировки сигналов управления в соответствии с программой и с информацией о фактическом состоянии объекта.

В системах автоматического программного регулирования, которые могут заменить человека при управлении самыми сложными производственными процессами, с функциями регулятора наиболее успешно может справиться быстродействующее вычислительное устройство — электронная вычислительная машина. Ее роль заключается в вычислении того, какие сигналы управления должны быть поданы для наиболее благоприятного протекания процессов. Развернутая блок-схема автоматической системы программного регулирования производственного процесса, характеризуемого несколькими параметрами, приведена на рис. 6.

Предположим, что работа управляемого объекта O характеризуется следующими параметрами: скоростью v, давлением p и температурой t. Пусть заданными программой работы значениями этих параметров являются величины v_0, p_0 и t_0. Пусть, наконец, на процесс влияют такие внешние данные, как температура окружающей среды $t_{вн}$ и атмосферное давление $p_{вн}$. Тогда в вычислительное устрой-

ство $ВУ$, призванное выполнять логические функции наиболее благоприятного управления данным производственным процессом, должна поступать следующая информация. Во-первых, в него должна быть введена программа работы, определяемая заданными значениями v_0, p_0 и t_0. Во-вторых, в $ВУ$ должна поступать информация о влияющих на производственный процесс внешних факторах $p_{вн}$ и $t_{вн}$. Величины $p_{вн}$ и $t_{вн}$ должны быть измерены измерительными приборами $И_1$ и $И_2$, и показания их после преобразования преобразователями $П_1$ и $П_2$ в удобные для ввода сигналы вводятся в $ВУ$. В-третьих, в $ВУ$ должны быть введены данные о фактических параметрах работы объекта v, p, t, измеряемых приборами $И_3$, $И_4$ и $И_5$ и преобразуемых в удоб-

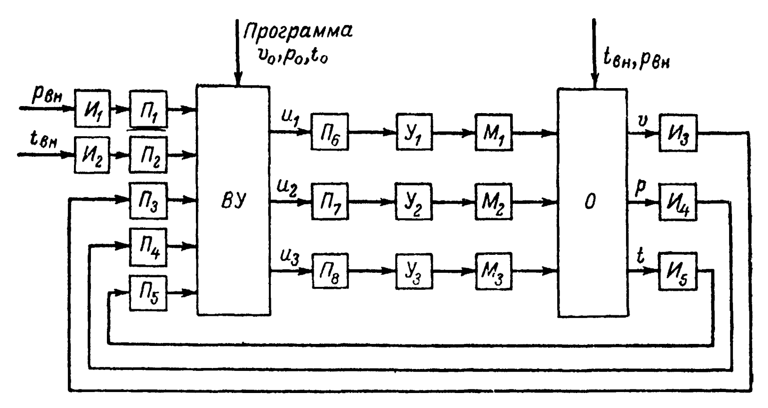


Рис. 6. Развернутая блок-схема автоматической системы программного регулирования с применением вычислительного устройства.

ную для ввода форму преобразователями $П_3$, $П_4$ и $П_5$. В вычислительном устройстве происходит переработка всей полученной информации, причем сличаются фактические данные о работе объекта v, p и t с заданными v_0, p_0 и t_0, учитываются внешние факторы $p_{вн}$ и $t_{вн}$ и вырабатываются управляющие сигналы U_1, U_2 и U_3, которые преобразуются преобразователями $П_6$, $П_7$ и $П_8$ в удобную форму, усиливаются усилителями $У_1$, $У_2$ и $У_3$ и поступают на исполнительные механизмы $М_1$, $М_2$ и $М_3$, воздействующие на управляемый объект $О$ таким образом, чтобы его параметры соответствовали заданным.

Описанные системы автоматического регулирования, обладающие жесткими характеристиками, иногда работают хуже неавтоматических систем с участием человека—опера-

тора, который может при необходимости, приспосабливаясь к течению регулируемого процесса, изменять способы управления.

Успехи, достигнутые в разработке электронных вычислительных машин, позволили создать так называемые самонастраивающиеся системы автоматического регулирования, в которых кроме основного управляющего устройства существует еще второе управляющее устройство, как бы «наблюдающее» за ходом производственного процесса и за ходом автоматического регулирования его первым управляющим устройством. Если действия этого первого (основного) управляющего устройства не обеспечивают достаточно хорошего управления, то второе управляющее устройство воздействует на первое: изменяет самый режим и приемы регулирования, и таким образом достигается наиболее благоприятный режим работы всей системы.

3. ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ

Из изложенного ранее следует, что в процессе автоматического управления происходят передача различных сигналов (информации) по каналам связи и переработка этой информации в регуляторах. Поэтому одним из важнейших разделов кибернетики является так называемая теория информации, которую в техническом понимании можно определить как теорию передачи сообщений по каналам связи.

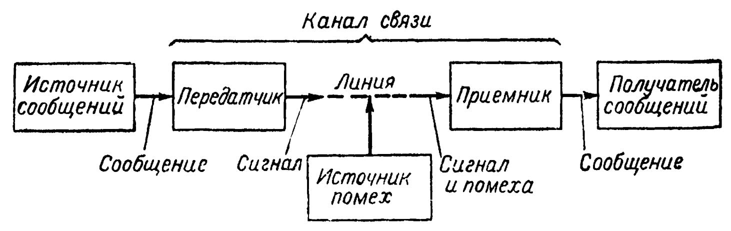


Рис. 7. Схема передачи сообщений по системе связи.

Рассмотрим схему передачи сообщений по каналу связи, приведенную на рис. 7. Вырабатываемое источником и подлежащее передаче сообщение (человеческая речь, музыка, текст телеграммы, изображение и т. д.) нужно превратить предварительно в электрический сигнал, удобный для передачи по линии. Это превращение происходит в передатчике, к которому мы будем относить микрофон, телеграфный ключ, передающую телевизионную трубку и другие преобра-

зователи сообщений в электрические сигналы, а также необходимые генераторы колебаний высокой частоты, модуляционные устройства, усилители и т. д. Из передатчика сигнал поступает в линию (провода, кабель, радиолиния) и распространяется по ней до приемника, в котором происходит обратное преобразование сигнала в сообщение, доставляемое получателю. Передатчик, линия и приемник образуют канал связи. При передаче по каналу связи происходят поглощение и искажение сигнала, и, кроме того, источники помех примешивают к сигналу помехи, которые в конечном счете также мешают правильному воспроизведению сообщения на приемном конце. Основные проблемы, которые стоят перед теорией информации, это, во-первых, вопрос о наиболее производительном использовании канала, т. е. о том, как передать по каналу наибольшее количество сообщений, и, во-вторых, вопрос о надежности связи, т. е. способности системы связи донести сообщение к получателю с минимальными потерями и искажениями.

Рассмотрим прежде всего вопрос об эффективности использования канала связи. Роль канала связи заключается в транспортировании сообщений от источника к получателю. Поэтому с точки зрения техники передачи нужно найти такие свойства сигналов, которыми удобно характеризовать условия их перемещения по каналу. Можно провести некоторую аналогию между транспортом сигналов и грузов по путям сообщения. С точки зрения техники перевозок нас интересуют далеко не все характеристики груза. Так, например, с точки зрения транспортника очень важными являются такие характеристики, как вес груза и его габариты (размеры). Однако, например, цвет этого груза не влияет на технические условия его перевозки. Подобно этому и сигнал можно характеризовать некоторыми основными параметрами (свойствами), имеющими наибольшее значение при его передаче по каналу. Такими свойствами сигнала являются, очевидно, его величина или интенсивность и полоса частот, занимаемая сигналом, так как этими параметрами определяются соответствующие требования к каналу связи, а также длительность сигнала, определяющая время занятия канала. В то же самое время смысл сообщения, заключающегося в данном сигнале, не играет никакой роли с точки зрения техники передачи. Передача сообщений «Вышел из строя оконечный каскад мощного усилителя» или «Встречай двадцатым поездом в понедельник вагон 11» требует одинакового времени и одинаковых

затрат электрической энергии, так как каждое из этих сообщений содержит одинаковое количество букв, хотя они и резко отличаются друг от друга по смыслу.

Остановимся более подробно на основных, с точки зрения передачи, характеристиках сигнала. Важнейшее значение имеет интенсивность сигнала, выражаемая его электрической мощностью. Однако, так как практически свойства сигнала как переносчика сообщений определяются не абсолютной его величиной, а превышением уровня сигнала над уровнем помех, то в качестве мерила интенсивности сигнала выбирают отношение мощности сигнала P_c к мощности действующей в канале помехи P_n. При этом для получения более удобных математических соотношений берут не абсолютную величину этого отношения, а его логарифм. Таким образом, величина превышения сигнала над помехой, или относительный средний уровень сигнала над помехой, равна

$$H = \log \frac{P_c}{P_n} ^{*}.$$

Следующим параметром сигнала является ширина его спектра F, представляющая собой разность между максимальной и минимальной частотами, имеющимися в спектре сигнала:

$$F = f_{макс} - f_{мин}.$$

Наконец, сигнал характеризуется длительностью T, равной разности между временем прекращения сигнала $t_к$ и временем его начала $t_н$:

$$T = t_к - t_н.$$

Если представить выбранные нами характеристики сигнала в виде отрезков прямых, выраженных в определенном масштабе, и отложить эти отрезки параллельно трем взаимно-перпендикулярным осям координат: оси уровней, оси частот и оси времен, то можно геометрически представить себе сигнал в виде объема параллелепипеда с ребрами H, F и T, представляющими собой как бы габариты сигнала (рис. 8). Произведение $V = HFT$ назовем объемом сигнала.

---

[1] Этим выражением для H удобно пользоваться при значительном превышении силы сигнала над помехами. Более точным является выражение $H = 2\log\left(1 + \frac{U_c}{U_n}\right)$.

Аналогичными параметрами можно характеризовать и канал связи. Обозначим через $H_к$ допустимый диапазон изменений мощности в канале, $F_к$ — ширину спектра частот, пропускаемых каналом, и $T_к$ — время занятия канала. Тогда свойства канала в целом можно характеризовать произведением $V_к = H_к F_к T_к$, которое назовем емкостью канала.

Для того чтобы канал обеспечивал передачу данного сигнала, нужно, чтобы соблюдалось условие $V_к \geqslant V$, т. е. чтобы объем сигнала умещался в емкости канала. Емкость действующих каналов связи обычно бывает больше объема передаваемых по ним сигналов, и для повышения эффективности использования каналов необходимо, применяя соответствующие способы преобразования сигнала, добиваться возможно более полного заполнения емкости канала объемом сигнала, т. е. добиваться соблюдения равенства $V_к = V$. Однако передача сигналов в системе связи не является самоцелью. Нас в конечном счете интересует не передача сигналов, а передача сообщений; сигналы являются лишь удобной для передачи формой, в которую преобразуются сообщения. Поэтому задача эффективного использования канала связи требует также максимального заполнения объема сигнала передаваемыми сообщениями или информацией. Однако, если мы относительно легко справились с измерением объема сигнала и емкости канала, то измерение количества сообщений или количества информации является весьма нелегкой задачей, особенно учитывая качественное своеобразие различных сообщений (буквенный текст, речь, музыка, изображение) и необходимость найти такую единицу измерения, которая оказалась бы пригодной для измерения этих качественно различных видов информации. После длительных поисков за единицу информации условились принять так называемую двоичную единицу информации, которая представляет собой количество

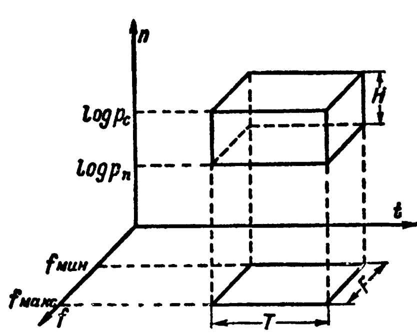


Рис. 8. Геометрическое представление сигнала.

информации, получаемой в результате одиночного выбора из двух равновероятных возможностей. Разберемся в этом определении. Предположим, что у нас есть ящик, в который мы опустили два белых шара. Извлечем теперь один из шаров Конечно, этот шар будет белым, и ничего нового мы в результате такого эксперимента не узнаем. Так как мы заранее знали, что извлечем белый шар, то, вынимая его, мы не получаем никаких новых сведений, никакой информации. Количество информации, полученной в результате осуществленного нами эксперимента, равно нулю.

Опустим теперь в ящик один белый и один черный шары. Теперь мы уже не можем заранее предсказать, какого цвета шар будет вынут из ящика. Вероятности извлечения черного или белого шара совершенно одинаковы, и, таким образом, извлекая тот или иной шар, т. е. осуществляя одиночный выбор из двух равновероятных возможностей, мы узнаем нечто заранее нам неизвестное, получаем некоторую информацию, количество которой и условились принимать равным одной двоичной единице.

Предположим теперь, что мы опустили в урну 32 билета с написанными на них различными буквами алфавита. Если билеты хорошо перемешаны, то вероятность извлечения любого из билетов одинакова. Попробуем подсчитать в двоичных единицах количество информации, которое мы получаем при извлечении одного из билетов. Для этого нужно свести процесс отыскания определенного билета к серии одиночных выборов из двух равновероятных возможностей. Сделать это можно так. Разделим все билеты на две равные группы по 16 билетов в каждой. Интересующий нас билет окажется в одной из этих групп. Ту группу, где нужного билета нет, отложим в сторону, а оставшуюся опять разделим пополам. Теперь, в результате второго эксперимента, нужный билет окажется в одной из групп по восьми билетов. Будем производить такие выборы из двух равновероятных возможностей до тех пор, пока в группе не останется только один интересующий нас билет. Нетрудно подсчитать, что это получится в результате пяти выборов из двух равновероятных возможностей. Отсюда можно сделать заключение, что количество информации, получаемой в результате извлечения одного из 32 равновероятных билетов, будет равно пяти двоичным единицам Вообще нетрудно показать, что при таком подходе к измерению информации количество информации I, получаемой при совершении одного

из n равновероятных событий, будет равно логарифму числа этих событий, взятому при основании 2:

$$I = \log_2 n.$$

Все сказанное до сих пор относится к информации, получаемой в результате совершения одного из нескольких равновероятных событий. Однако в реальных случаях передачи информации по каналам связи мы имеем дело, как правило, с событиями неравновероятными. Так, например, при передаче телеграфного текста на русском языке вероятность получения буквы *О* значительно больше вероятности получения буквы *Ы*, так как в русском тексте *О* встречается приблизительно в 6 раз чаще, чем *Ы*. Сравнительно несложный вывод позволяет определить информацию I, приходящуюся на одну букву алфавита языка, характеризующегося определенным распределением вероятностей появления отдельных букв:

$$I = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \ldots + p_n \log_2 p_n) \text{ дв. ед.}$$

В этом выражении $p_1, p_2, \ldots, p_n$ представляют собой вероятности появления каждой из n букв в данном языке. Разъясним, что вероятностью p какого-либо события называют отношение числа интересующих нас событий к общему количеству совершившихся событий при достаточно большом общем количестве событий, т. е. при массовом характере операций. Например, чтобы определить вероятность появления в тексте на данном языке букв *а*, *б* и т. д., нужно взять какую-либо книгу, напечатанную на этом языке, подсчитать общее количество букв в тексте n и количество букв *а* ($n_а$) *б* ($n_б$) и т. д. Тогда вероятность буквы *а* будет $p_а = \frac{n_а}{n}$, вероятность буквы *б* $p_б = \frac{n_б}{n}$ и т. д. Вероятность любого события p всегда меньше или равна единице ($p \leq 1$). Вероятность достоверного события равна единице; такова, например, вероятность извлечения белого шара из урны, наполненной только белыми шарами. Вероятность невозможного события равна нулю (например, вероятность извлечения белого шара из урны, наполненной только черными шарами). Следует еще раз подчеркнуть, что близкие к истине результаты определения вероятностей можно получить лишь при анализе достаточно массовых операций. Так, для определения вероятностей появления букв в тексте можно взять

любую достаточно толстую книгу на данном языке, и результаты при этом практически совпадут. Однако, если мы попробуем определить вероятности букв, анализируя лишь одну страницу текста, результаты получатся различные, а при анализе только одной строчки можно получить совершенно далекие от истины результаты. Ведь если в этой строчке, предположим, совсем отсутствовала буква *д*, то мы найдем, что вероятность ее $p_д = 0$, т. е. сделаем нелепый вывод о том, что появление буквы *д* в русском тексте является невозможным событием.

Выше мы описали способ, удобный для измерения так называемой дискретной информации, т. е. информации, складывающейся из последовательности отдельных (дискретных) элементов — букв. Текст сообщения, передаваемого по телеграфу, является типичным примером дискретной информации. Однако значительно чаще происходит передача непрерывной информации, типичным примером которой является передача телефонного сообщения. В самом деле, ток в телефонной цепи представляет собой функцию, непрерывно изменяющуюся во времени (рис. 9). Непрерывную функцию времени представляет собой и телевизионный сигнал. Такая функция вообще на конечном интервале времени от t_1 до t_2 может быть вполне точно выражена лишь бессчетным множеством значений, т. е. бесконечным количеством чисел, соответствующих мгновенным значениям функции. Однако практически мы всегда имеем дело с ограниченными по спектру функциями. Любая функция сложной формы может быть представлена в виде суммы синусоидальных колебаний основной частоты и ряда гармоник, причем спектр звуковых частот ограничивается высшей частотой около 10 *кгц*, а при телефонной связи — частотой порядка 3—5 *кгц*.

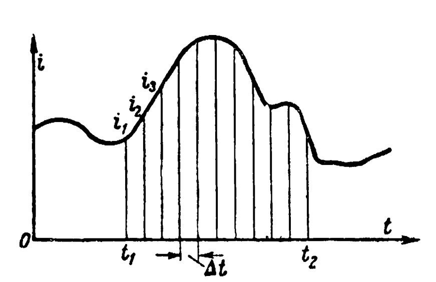


Рис. 9. График непрерывной функции времени.

Для таких функций В. А. Котельниковым доказана очень важная теорема, гласящая, что функция с частотным спектром, ограниченным высшей частотой $f_в$, может быть совершенно точно представлена конечным числом отдельных

значений i_1, i_2, i_3, ..., отсчитанных через интервалы времени:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_в}$$

Теорема В. А. Котельникова позволяет, таким образом, представлять непрерывную информацию в виде дискретной и, в частности, распространить на непрерывную информацию методы определения ее количества, основанные на измерении количества дискретной информации. На основании этой теоремы разработаны практические методы так называемого квантования сигнала, т. е. передачи непрерывного сигнала в виде последовательности его дискретных значений, что находит самое широкое применение при различных видах импульсной модуляции.

На основе достижений теории информации в настоящее время разработан ряд наиболее совершенных способов кодирования сообщений. Это позволяет добиваться наиболее полного использования каналов связи, а также значительно повышать надежность передачи информации. В частности, разработаны новые методы модуляции, так называемый корреляционный метод приема, позволяющий выделять полезный сигнал при наличии превышающей его по уровню помехи; специальные корректирующие коды, т. е. коды, позволяющие обнаруживать и исправлять появившиеся ошибки, и т. д.

Одним из весьма важных вопросов как с точки зрения связи, так и с точки зрения работы электронных вычислительных машин является вопрос о наиболее простых, удобных и совершенных методах кодирования величин. Любую величину мы, как известно, представляем (кодируем) в виде числа, причем всемирное распространение получила сейчас так называемая десятичная система счисления, основанная на использовании десяти символов — цифр 0, 1, 2, 3, ..., 9 и возникшая первоначально как результат использования людьми для счета десяти пальцев рук. Однако десятичная система вовсе не является единственной возможной системой. В разное время разные народы пользовались различными системами счисления. Так, у древних индейцев племени майя применялась двадцатеричная система счисления, в которой после единиц следовали не десятки, а двадцатки, а после десятков не сотни, а четырехсотки (двадцать двадцаток). Еще и сейчас сохранились остатки двенадцатеричной системы (счет на дюжины, гроссы, т. е. дюжины дюжин и т. д.).

Для выражения чисел в двадцатеричной системе нужно располагать двадцатью цифрами, а в двенадцатеричной — двенадцатью цифрами. Возможны системы и со значительно меньшим количеством цифр. Так, в наиболее примитивной единичной системе достаточно иметь только одну цифру 1, при помощи которой можно выразить любое число следующим образом.

Десятичная система 1 2 3 4 ... 8 ...

Единичная система 1 11 111 1111 ... 11111111 ...

Можно построить пятеричную (с пятью цифрами), троичную (с тремя цифрами), двоичную (с двумя цифрами) и бесконечное число других систем счисления.

Наибольший интерес для связи, телемеханики, телеизмерений, и особенно для современной вычислительной техники, представляет двоичная система счисления, в которой любое число можно записать, располагая лишь двумя цифрами 0 и 1.

Вследствие исключительных преимуществ применения двоичной системы в современных вычислительных и управляющих электронных машинах остановимся несколько подробнее на принципах ее построения и методах вычислений.

4. ДВОИЧНАЯ СИСТЕМА СЧИСЛЕНИЯ

В десятичной системе счисления любое целое число N мы представляем в виде суммы произведений различных степеней десяти на коэффициенты, которые могут принимать одно из десяти возможных значений.

Сокращенно это можно записать так:

$$N = \sum_{i=0}^{i=n-1} K_i \cdot 10^i,$$

где $K_i = 0, 1, 2, \ldots, 9$, а n — число разрядов в числе. Например, четырехразрядное число 7405 мы можем представить в виде суммы: $7405 = 7 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$. Здесь $K_0 = 5$, $K_1 = 0$, $K_2 = 4$ и $K_3 = 7$.

Для упрощения записи числа мы пишем только значения этих коэффициентов 7, 4, 0, 5, располагая их слева направо по убывающим номерам. При этом мы помним, что если коэффициент стоит на первом месте справа, то он означает количество десятков в нулевой степени, т. е. количество единиц, а если он стоит, например, на четвертом месте справа, то означает количество десятков в кубе, т. е. количество тысяч, и т. д.

Двоичная система счисления строится по такому же принципу, но в качестве основания степени при этом выбирается не 10, а 2, и любое целое число записывается в виде

$$N = \sum_{i=0}^{i=n-1} K_i \cdot 2^i,$$

причем K_i может принимать лишь два значения: 0 или 1. Например, число 21 в двоичной системе можно представить в виде суммы:

$$21 = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Записать же это число по такому же принципу, как и в десятичной системе, можно в виде последовательно расположенных коэффициентов при соответствующих степенях, т. е. в виде

$$21 \rightarrow 10101.$$

Эту запись при чтении мы расшифровываем так: один раз $2^0=1$; ни разу $2^1=2$; один раз $2^2=4$; ни разу $2^3=8$; один раз $2^4=16$. Итого $16+0+4+0+1=21$.

Таблица 1

Числа, записанные в системах счисления		Числа, записанные в системах счисления	
десятичной	двоичной	десятичной	двоичной
0	0	10	1010
1	1	11	1011
2	10	12	1100
3	11	13	1101
4	100	14	1110
5	101	15	1111
6	110	16	10000
7	111	17	10001
8	1000	18	10010
9	1001	19	10011
			и т. д.

Приведем сравнительную запись простейших чисел в десятичной и в двоичной системах исчисления.

Для быстрого перевода чисел из десятичной системы в двоичную можно пользоваться следующим правилом. Нужно выписать в столбец число в десятичной системе и результаты его последовательного деления на 2 с округлением до целого числа в сторону уменьшения, затем против каждого нечетного числа поставить 1, а против четного — 0 и полученные в порядке снизу вверх единицы и нули записать в строчку слева направо.

7405	1
3702	0
1851	1
925	1
462	0
231	1
115	1
57	1
28	0
14	0
7	1
3	1
1	1

Проиллюстрируем это правило примером превращения числа 7405 из десятичной системы в двоичную. Делим его на 2, получаем 3702,5, но, округляя до целого числа в сторону уменьшения, записываем 3702, опять делим на 2, записываем 1851 и т. д., пока не получим 1.

Затем пишем против нечетных чисел единицы, а против четных — нули и записываем полученное двоичное число 1110011101101, которое действительно, в результате проверки, оказывается равным десятичному числу 7405.

Сравним с точки зрения машинного счета рассмотренную нами двоичную систему счисления с десятичной. Равновеликие числа имеют в двоичной системе в среднем в 3—4 раза большее количество разрядов, чем в десятичной системе. В нашем примере четырехразрядное число 7405 в двоичной системе изображается тринадцатиразрядным числом 1110011101101. Это является недостатком двоичной системы. Однако при этом цифровая грамота значительно упрощается. Вместо десяти символов — цифр 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9, необходимых для изображения чисел в десятичной системе, любое число в двоичной системе мы выражаем пользуясь лишь двумя символами: 0 и 1. Сравним возможности изображения (кодирования) числа в виде электрических напряжений или токов при различных системах счисления (рис. 10). Любое число можно закодировать и пере-

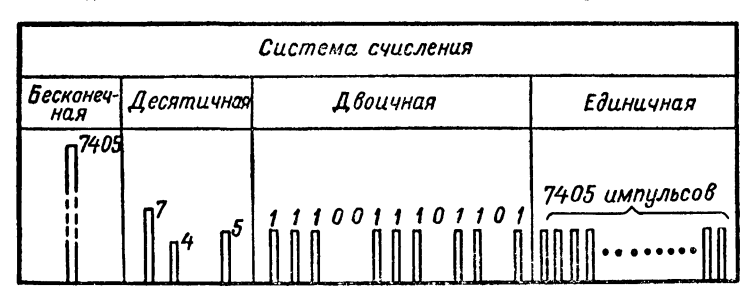


Рис. 10. Кодирование числа 7405 при различных системах счисления.

дать в так называемой бесконечной системе счисления в виде импульса напряжения или тока, пропорционального по величине этому числу. Так, число 7405 можно закодировать импульсом напряжения в 7405 *в*.

В десятичной системе счисления число можно закодировать в виде последовательности из четырех импульсов, пер-

вый из которых будет иметь напряжение 7 *в*, второй — 4 *в*, третий — 0 *в* и четвертый—5 *в*.

Предположим теперь, что амплитуда импульсов снизилась на 1% из-за снижения напряжения источников питания или вследствие поглощения в цепи передачи. Тогда в первом случае напряжение импульса 7405 *в* снизится до 7405—74,05=7330,95 *в*, и, таким образом, мы получим не то число, которое хотели передать (погрешность при передаче составит тоже 1%). Если на 1% уменьшится амплитуда импульсов при кодировании по десятичной системе счисления, то так как импульсы изображают лишь целые числа, мы, очевидно, сможем по величине 5—0,05=4,95 *в* догадаться путем округления, что данный импульс изображал число 5. Таким образом, десятичная система счисления обеспечивает несколько более надежное кодирование информации. Впрочем, это повышение надежности имеет место лишь в том случае, если изменение амплитуды импульсов не превышает нескольких процентов.

В двоичной системе счисления число 7405 записывается в виде 1110011101101 и может быть закодировано в виде последовательности из 13 импульсов, причем импульсы, соответствующие единицам, могут иметь любое, скажем положительное, значение, а импульсы, соответствующие нулям, должны иметь амплитуду, равную нулю, или могут иметь любое отрицательное значение. Теперь колебания источников питания или изменение амплитуды импульсов при передаче даже на десятки процентов никак не скажутся на достоверности информации, ибо при двоичном кодировании нас интересует не величина импульса, а сам факт его существования. Есть импульс — значит записана единица, нет импульса — нуль.

Наконец, в единичной системе счисления число 7405 можно представить в виде последовательности из 7405 импульсов любой амплитуды. Таким образом, по достоверности единичная система кодирования не уступает двоичной, но она крайне неудобна, так как большие числа представляются большим количеством импульсов и, значит, требуют очень большого времени для записи и передачи.

Сравнивая свойства кодирования в рассмотренных нами четырех системах счисления, можно отдать безусловное предпочтение двоичной системе, при которой, с одной стороны, обеспечивается наиболее высокая достоверность информации и, с другой стороны, запись и передача чисел, хотя и длительнее, чем при всех других (кроме единичной)

системах, но все же занимает вполне приемлемое время. При длительности импульсов порядка микросекунд общее время, необходимое для передачи числа, не превышает десятков или сотен микросекунд.

С точки зрения машинной вычислительной техники кодирование по двоичной системе счисления обладает весьма существенным преимуществом, так как позволяет строить машины из весьма простых элементов с двумя устойчивыми положениями: двухпозиционных электромагнитных или электронных реле, магнитных элементов с прямоугольной петлей гистерезиса и т. д. Такие элементы значительно проще и надежнее, чем элементы с десятью устойчивыми положениями. Это преимущество удается реализовать в машинах, условно считая, что одно из устойчивых положений, например начальное, соответствует нулю, а второе — рабочее — единице. Наконец, самым важным преимуществом двоичной системы является крайняя простота правил выполнения арифмстических операций. В самом деле, для сложения чисел в двоичной системе нужно знать лишь следующие правила (таблицу сложения):

$$0+0=0$$

$$0+1=1$$

$$1+0=1$$

$$1+1=10$$

Последнюю строчку мы должны расшифровать так: $1+1$ даст в сумме 0 и в переносе в следующий разряд 1.

Таблица умножения в двоичной системе выглядит так:

$$0\times 0=0$$

$$0\times 1=0$$

$$1\times 0=0$$

$$1\times 1=1$$

Технические правила выполнения арифметических действий остаются в двоичной системе такими же, как и в десятичной. Произведем, например, в двоичной системе сложение и перемножение чисел 5 (101) и 9 (1001):

$$\begin{array}{r} 5 \rightarrow 101 \\ + \\ 9 \rightarrow 1001 \\ \hline 14 \leftarrow 1110 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 5 \rightarrow 101 \\ \times \\ 9 \rightarrow 1001 \\ \hline 101 \\ 000 \\ 000 \\ 101 \\ \hline 45 \leftarrow 101101 \end{array}$$

По общим правилам можно в двоичной системе также выполнять и вычитание и деление.

Все сказанное в настоящем параграфе и объясняет тот факт, что при кодировании информации для ее передачи по каналам связи и для ее переработки в быстродействующих электронных вычислительных машинах двоичная система счисления получает в настоящее время почти повсеместное применение.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Быстрое развитие науки и техники требует осуществления непрерывно возрастающего количества все более сложных и трудоемких расчетов и вычислений. Человечество издавна пользуется всевозможными счетными приборами, облегчающими вычислительную работу. К таким приборам относятся обычные конторские счеты, логарифмическая линейка, арифмометр, всевозможные счетно-решающие и перфорационные машины механического действия, электронные моделирующие и цифровые вычислительные машины. Все эти разнообразные вычислительные приборы можно разделить на две основные группы: моделирующие и цифровые вычислительные приборы и машины. В моделирующих приборах числа, с которыми производятся всевозможные операции, моделируются некоторыми физическими величинами. Классическим примером моделирующего прибора может служить такое широко распространенное счетное приспособление, как логарифмическая линейка. Здесь числа моделируются длинами. Производя те или иные операции на линейке, мы фактически складываем или вычитаем определенные участки длины корпуса и движка, на которых в логарифмическом масштабе нанесены числа. Числа можно

моделировать и углами поворота вала, давлениями, токами, напряжениями и т. д. Представим себе суммирующую схему (рис. 11), состоящую из двух потенциометров $П_1$ и $П_2$, при помощи которых мы можем установить напряжения U_1 и U_2, соответствующие слагаемым и измеряемые вольтметрами V_1 и V_2. Тогда вольтметр V покажет нам напряжение $U = U_1 + U_2$, т. е. напряжение, соответствующее сумме. Таким образом, мы сразу получим готовый ответ — сумму. Применяя относительно несложные ламповые схемы, можно также быстро осуществлять простые арифметические действия, тригонометрические операции, интегрирование и т. д. Главным достоинством моделирующих машин является высокая скорость их работы, обеспечивающая решение сложных математических задач за время порядка секунд или даже долей секунды. Однако моделирующие машины обладают и серьезным недостатком: сравнительно малой точностью

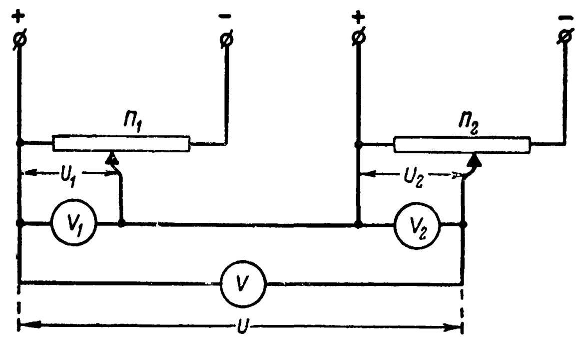


Рис. 11. Простейшая электрическая суммирующая схема.

вычислений. Известно, например, что при вычислениях на логарифмической линейке мы получаем всего два-три точных знака. В электрических и электронных моделирующих машинах на точность вычислений влияют помехи, колебания напряжения источников питания. Наконец, вообще в условиях быстрой работы трудно точно устанавливать и измерять напряжения или токи с высокой точностью. Поэтому практически электромоделирующие устройства дают погрешности порядка единиц процентов. Другим недостатком моделирующих машин является их специализированный характер: схема и устройство машины обеспечивают решение задач определенного типа; для решения задач другого типа необходимо применять иную машину.

Описанные свойства моделирующих машин определяют и область их применения для решения инженерных задач, а также задач военного характера (стрельбы, бомбометание и т. д.), для которых точность порядка единиц процентов оказывается достаточной и в то же время требуются большая скорость работы и простота эксплуатации.

Цифровые вычислительные машины работают на принципах поразрядного счета. Широко распространенными простейшими цифровыми устройствами являются конторские счеты и арифмометры. Точность работы этих приборов принципиально не ограничена: она обуславливается лишь их конструкцией, т. е. количеством проволок с костяшками в счетах и количеством цифровых колес в арифмометрах. Именно это свойство цифровых устройств — высокая точность вычислений и обусловливает их исключительное использование в бухгалтерских работах. Вершиной современной вычислительной техники являются электронные цифровые машины, дающие возможность осуществлять вычисления с большими скоростями, порядка десятков тысяч арифметических операций в секунду, и с точностями порядка десятков правильных знаков. Важнейшим положительным свойством электронных цифровых машин является также их универсальность. Одна и та же машина может решать самые разнообразные вычислительные и логические задачи, и, следовательно, электронные цифровые машины открывают широкие перспективы механизации умственного труда. Будущее кибернетики тесно связано в первую очередь с развитием цифровых машин, и поэтому мы в дальнейшем сосредоточим наше внимание на их устройстве и работе.

Рассмотрим упрощенную блок-схему электронной цифровой машины (рис. 12). На этой схеме показаны только самые основные блоки машины и их связи между собой. Главнейшими частями машины являются запоминающее, арифметическое и управляющее устройства. Запоминающее устройство *ЗУ* или, короче, «память» машины служит для более или менее длительного хранения информации, введенной в машину, промежуточных и окончательных результатов произведенных машиной вычислений. В арифметическом устройстве *АУ* происходят соответствующие программе арифметические операции над числами, которые поступают в него из *ЗУ*, причем результаты этих операций возвращаются и фиксируются в «памяти» машины. Наконец, управляющее устройство *УУ* служит для управления всеми

элементами машины в соответствии с введенной в нее программой. Через входное устройство *Вх.У* осуществляется ввод в машину исходных данных и программы вычислений, а через выходное устройство *Вых.У* — вывод окончательных, а в ряде случаев и важных промежуточных результатов вычислений из машины. Цепи передачи информации (чисел, программы) показаны на схеме сплошными линиями, а цепи управления — пунктирными линиями. Таким образом, если, предположим, по программе машина должна выполнить операцию сложения двух чисел, то управляющее устройство подготовит *АУ* для выполнения сложения, а устройство памяти выдаст в *АУ* числа, подлежащие сложению. Сумма из *АУ* поступит вновь в *ЗУ*, и если она является окончательным результатом, то из *ЗУ* поступит в выходное устройство и будет отпечатана.

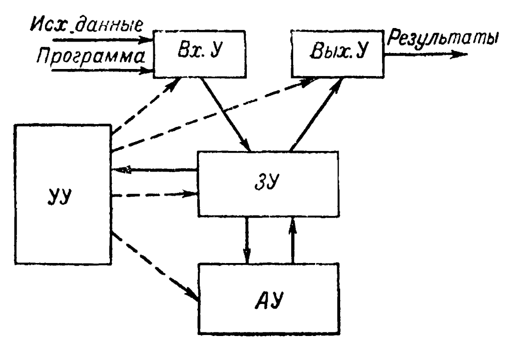


Рис. 12. Блок-схема электронной цифровой машины.
Вх. У — входное устройство; *Вых. У* — выходное устройство; *УУ* — управляющее устройство; *ЗУ* — запоминающее устройство; *АУ* — арифметическое устройство.

В дальнейшем мы рассмотрим, как работает каждое из устройств машины. Однако, так как и арифметические, и запоминающие, и управляющие устройства могут включать в себя электронные реле с двумя устойчивыми состояниями (так называемые триггеры, или спусковые схемы), остановимся прежде всего на схеме и принципе работы триггера.

2. ТРИГГЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Существует большое количество различных вариантов схем триггеров. На рис. 13 представлен один из простейших вариантов схемы триггера на двух вакуумных триодах. Схема представляет двухламповый усилитель с положительной обратной связью. На первый взгляд кажется, что при

полной симметрии всех элементов схемы она будет находиться в состоянии равновесия и токи в обеих лампах i_{a_1} и i_{a_2} будут одинаковы. Однако при более детальном рассмотрении схемы оказывается, что это равновесие является неустойчивым. Как карандаш даже при идеально вертикальной установке его на острие упадет под действием какой-либо случайной причины (сотрясения, дуновения воздуха и т. д.), причем мы не можем заранее предсказать, в какую сторону, так и триггер, предоставленный самому себе, перейдет в одно из двух устойчивых состояний, при котором ток в одной лампе достигнет некоторой максимальной, а во второй — минимальной величины.

В самом деле, представим себе, что по какой-либо случайной причине ток i_{a_1} в лампе $Л_1$ хотя бы незначительно увеличился. Это немедленно приведет к увеличению падения напряжения на сопротивлении r_{a_1}, а, следовательно, к уменьшению напряжения на аноде первой лампы U_{a_1}. Но так как напряжение на сетке второй лампы U_{c_2} складывается из отрицательного падения напряжения $U_к$ на сопротивлении $r_к$ и положительного падения напряжения U'_{c_2} на сопротивлении r'_{c_2}, причем U'_{c_2} пропорционально U_{a_1} $\left(U'_{c_2} = U_{a_1}\frac{r'_{c_2}}{r_{c_1}+r'_{c_2}}\right)$, то уменьшение напряжения U_a приведет к снижению потенциала U_{c_2} на сетке лампы $Л_2$, а значит и к уменьшению тока i_{a_2}. Но уменьшение тока i_{a_2} приведет к уменьшению падения напряжения на сопротивлении r_{a_2}, повышению напряжения U_{a_2} на аноде лампы $Л_2$ и повышению потенциала U_{c_1} сетки $Л_1$, так как U'_c зависит от U_{a_2} $\left(U'_c = U_{a_2}\frac{r'_{c_1}}{r_{c_2}+r'_{c_1}}\right)$. Повышение потенциала U'_c вызовет дальнейшее увеличение тока i_{a_1}, снижение потенциала U_{a_2}, уменьшение тока i_{a_2} и т. д.

При соответствующем подборе элементов схемы этот процесс будет нарастать лавинообразно и прекратится, когда ток i_{a_1} в первой лампе достигнет некоторого наиболь-

шего значения, а лампа $Л_2$ окажется запертой отрицательным напряжением $U_{c_2}=-U_к+U'_{c_2}$. Подобное состояние является устойчивым и будет сохраняться сколь угодно долго, пока на вход *I* не будет подан отрицательный импульс напряжения. Этот импульс вызовет резкое снижение тока i_{a_1}, а значит увеличение U_{a_1} и U'_{c_2}, что приведет к отпиранию второй лампы, увеличению i_{a_2}, уменьшению U_{a_2}, снижению U'_{c_1} и, в конечном счете, к лавинообразному процессу, в результате которого триггер перейдет в новое устойчивое состояние, характеризующееся тем, что лампа $Л_1$ запирается, а ток в $Л_2$ достигнет наибольшего значения. Для возвращения схемы в первое положение теперь нужно подать отрицательный импульс на сетку второй лампы (*Вх.II*) Конденсаторы C_1 и C_2 служат для ускорения переброски триггера из одного устойчивого состояния в другое.

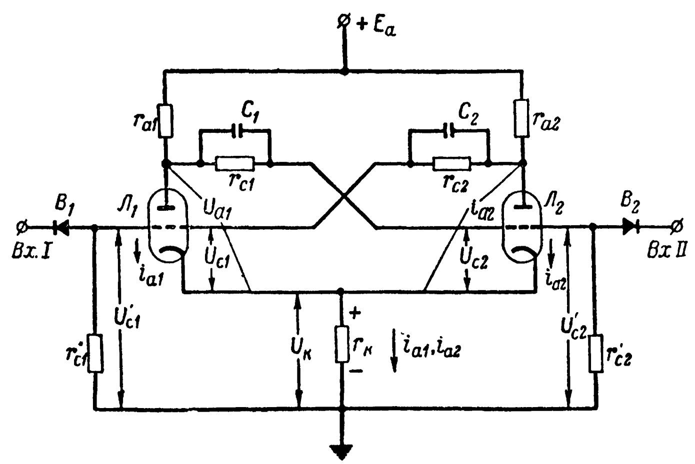


Рис. 13. Схема триггера на вакуумных триодах.

Схема триггера собирается обычно не на отдельных лампах, а на двух половинах одного двойного триода или пентода.

Дополним теперь рассмотренную нами схему в соответствии с потребностями счетной техники (рис. 14). Соединим оба входа между собой, в результате чего образуется один общий вход, сделаем отвод от анода лампы $Л_1$ и назовем его выходом триггера, соединим сетку лампы $Л_2$ через вентиль B_3 еще с одним входом, который назовем входом гашения, и подключим параллельно сопротивлению r_{a2} неоновую

лампочку, которая, очевидно, будет гореть лишь в том случае, когда ток i_{a2} достигнет большой величины и создаст на r_{a2} достаточное напряжение. Условимся считать начальным состоянием триггера такое, когда ток в первой лампе наибольший, а вторая лампа заперта, и припишем этому начальному состоянию символ 0. Второе состояние, когда заперта первая лампа, а ток во второй лампе наибольший, назовем рабочим и припишем ему символ 1. Признаком рабочего состояния триггера является горение неоновой лампочки *Н*.

Отрицательный импульс, поданный на общий вход, попадет на сетки обеих ламп. Однако в запертой лампе он не вызовет никаких изменений, а в открытой лампе ток резко снизится и триггер перейдет во второе устойчивое положение. Таким образом, подача отрицательного импульса на общий вход вызывает переброску триггера из начального состояния в рабочее или из рабочего в начальное. При

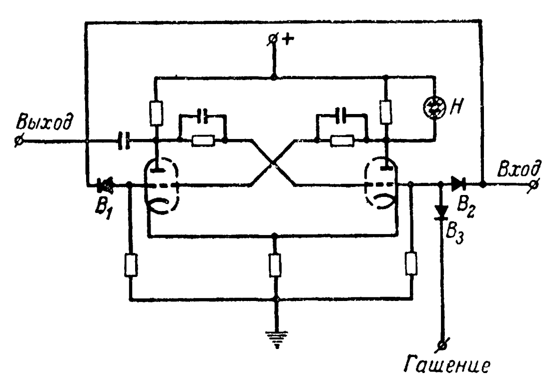


Рис. 14. Схема триггера как элемента счетной схемы.

подаче отрицательного импульса на вход гашения он попадает лишь на сетку лампы $Л_2$, так как вентиль B_2 не пропускает его в лампе $Л_1$ и, следовательно, триггер переходит в начальное состояние.

При переходе из начального состояния в рабочее потенциал на аноде лампы $Л_1$ резко повышается, что приводит к появлению на выходе триггера положительного импульса. При переходе из рабочего состояния в начальное потенциал U_{a1} резко падает и на выходе триггера появляется отрицательный импульс.

Рассмотрим теперь, как из нескольких триггеров можно составить схему счетчика импульсов, представляющего собой

один из вариантов запоминающих устройств. Для запоминания количества импульсов, которое выражается в двоичной системе счисления n-разрядным числом, счетчик должен содержать n триггеров. Блок-схема счетчика приведена на рис. 15, причем каждый триггер *Тр 1*, *Тр 2*, ..., *Тр n* показан упрощенно в виде прямоугольника с двумя входами (для рабочих импульсов и импульсов гашения), одним выходом, двумя лампами $Л_1$ и $Л_2$ и неоновой лампочкой *Н*. Счетчик предназначен для фиксации количества поступивших на его вход отрицательных импульсов. При поступлении первого импульса триггер *Тр 1* переходит в рабочее состояние, отчего зажигается лампочка *Н*, и на вход триггера *Тр2* подается

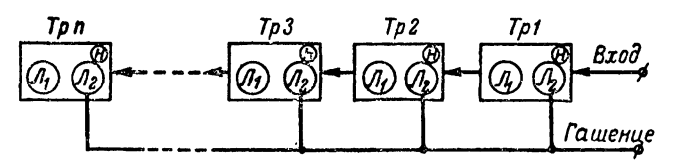


Рис. 15. Блок-схема счетчика на триггерах.

положительный импульс, который не изменяет состояния *Тр 2*, так как вентили $В_1$ и $В_2$ (рис. 14) не пропускают положительных импульсов в схему. Таким образом, после первого импульса установится состояние, характеризующееся первой строкой табл. 2.

Таблица 2

№ импульсов по порядку	Состояние триггеров; ○ — триггер в начальном состоянии, неоновая лампочка не горит; ● — триггер в рабочем состоянии, неоновая лампочка горит						Зафиксированное счетчиком количество	
	Тр n	...	*Тр 4*	*Тр 3*	*Тр 2*	*Тр 1*	в двоичной системе счисления	в десятичной системе счисления
1	○		○	○	○	●	0...0001	1
2	○		○	○	●	○	0...0010	2
3	○		○	○	●	●	0...0011	3
4	○		○	●	○	○	0...0100	4
5	○		○	●	○	●	0...0101	5
6	○		○	●	●	○	0...0110	6
7	○		○	●	●	●	0...0111	7
8	○		●	○	○	○	0...1000	8
9	○		●	○	○	●	0...1001	9
10	○		●	○	●	○	0...1010	10

Второй отрицательный импульс перебросит *Тр 1* в начальное состояние, его неоновая лампочка погаснет, с *Тр 1* на *Тр 2* поступит отрицательный импульс, который переведет *Тр 2* в рабочее состояние (вторая строка таблицы). Третий импульс вызовет переход *Тр 1* в рабочее состояние, четвертый импульс переведет *Тр 1* в начальное состояние, причем будет выдан отрицательный импульс на *Тр 2*, который также перейдет в начальное состояние и выдаст отрицательный импульс на *Тр 3*, который перейдет в рабочее состояние, и т. д. Табл. 2 характеризует состояние счетчика после каждого нового импульса.

Для того чтобы стереть информацию, зафиксированную счетчиком, нужно перевести все входящие в него триггеры в начальное состояние подачей отрицательного импульса на вход гашения. При этом все триггеры, находившиеся в рабочем состоянии, выдадут отрицательные импульсы, которые могут быть использованы как импульсы считывания или выборки информации из счетчика.

Как уже упоминалось, количество триггеров, из которых состоит счетчик, должно соответствовать количеству разрядов зафиксированного числа в двоичной системе счисления. Так, например, для хранения числа 4 нужно три триггера, для хранения числа 9 — четыре триггера и т. д Отсюда можно предположить, что для хранения очень больших чисел понадобится очень большое количество триггеров, но это не так. Например, для хранения числа 127 нужно лишь семь триггеров, для хранения числа 4095—12 триггеров, а для хранения числа в один миллион — лишь 20 триггеров. Однако запоминающие устройства на триггерах получаются все-таки громоздкими и требуют непрерывного расхода питания. Поэтому в настоящее время для хранения информации значительно более широкое применение находят другие устройства, описываемые дальше.

Рассмотрим теперь возможность применения триггера в качестве элемента арифметического устройства—сумматора. Схема одноразрядного сумматора на триггерах для последовательного сложения чисел в двоичной системе счисления приведена на рис. 16. Аноды ламп двух триггеров *Тр 1* и *Тр 2* питаются от источника E_a через сопротивления R_1, R_2 и R_3, шины $Ш_1$, $Ш_2$ и $Ш_3$ и вентили B_3, B_4, B_5, B_6, B_7 и B_8. По величине сопротивления R_1, R_2 и R_3 значительно больше сопротивлений ламп триггеров постоянному току. Поэтому, если какая-либо из ламп проводит ток, то на шинах, к которым она подключена, из-за большого падения

напряжения на сопротивлениях потенциал будет весьма невелик. Если же к шине подключены только запертые лампы, то на этой шине будет иметь место высокий положительный потенциал E_a. Напряжение на выходах схемы *С* (сумма) и *П* (перенос) связаны с потенциалами шин: напряжение на выходе *П* равно потенциалу $Ш_3$ относительно земли, а на выходе *С* — равно более высокому из потенциалов $Ш_1$ или $Ш_2$. Благодаря наличию вентилей B_1 и B_2 шина с более высоким потенциалом не шунтируется через шину с низким потенциалом.

Условимся, что наличие на выходе высокого потенциала означает 1, а низкий потенциал соответствует 0, и проследим, как осуществляются в схеме операции сложения. Слагаемые *А* и *Б* вводятся в триггеры *Тр 1* и *Тр 2*. После сложения каждого из разрядов триггеры должны быть посыл-

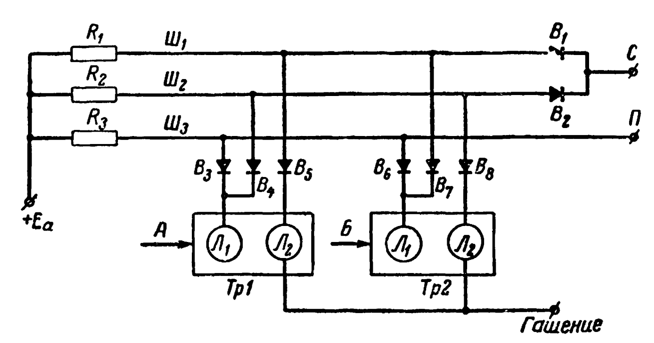


Рис. 16. Схема одноразрядного сумматора последовательного действия на триггерах.

кой гасящего импульса переведены в начальное состояние, при котором ток в $Л_1$ максимальный, а лампа $Л_2$ заперта. Если $A=0$ и $Б=0$, т. е. на входы триггеров не поступают импульсы, то оба триггера остаются в начальном состоянии, причем шина $Ш_1$ заземлена через $Л_1$ *Тр 2*, $Ш_2$ заземлена через $Л_1$ *Тр 1* и $Ш_3$ — через $Л_1$ *Тр 1* и $Л_1$ *Тр 2*. Следовательно, на всех шинах будет низкий потенциал и на обоих выходах *С* и *П* получим 0. Таким образом, реализуется операция сложения $0+0=0$. Если теперь число $А=1$ и $Б=0$, то *Тр 1* перейдет в рабочее состояние, причем $Ш_1$ будет заземлена через $Л_2$ *Тр 1* и $Л_1$ *Тр 2*, $Ш_3$ — через $Л_1$ *Тр 2*, а $Ш_2$ окажется незаземленной и высокий потенциал с нее попадет на выход *С*. Так будет реализована операция $1+0=1$ в сумме и 0 в переносе.

Аналогично будет работать схема и при $A=0$ и $Б=1$, только при этом высокий потенциал попадет на выход C с шины $Ш_1$. Если $A=1$ и $Б=1$, то оба триггера перебросятся в рабочее состояние, $Ш_1$ заземлится через $Л_2$ *Тр 1*, $Ш_2$ — через $Л_2$ *Тр 2*, а $Ш_3$ окажется незаземленной, благодаря чему высокий потенциал с нее попадет на выход *П*. Так будет реализована операция сложения $1+1=0$ в сумме и 1 в переносе. Однако в таком виде сумматор позволяет складывать лишь одноразрядные числа. Для сложения чисел с любым количеством разрядов необходимо составить схему, состоящую из двух сумматоров Σ_1 и Σ_2 и линии задержки *ЛЗ*, задерживающей проходящие через нее импульсы на один такт (рис. 17). Оба сумматора Σ_1 и Σ_2 совершенно одинаковы и каждый из них собран по схеме рис. 16, т. е. имеет два входа для ввода слагаемых *А* и *Б* и два выхода

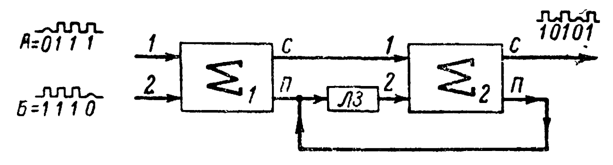


Рис. 17. Схема для суммирования многоразрядных чисел.

для вывода суммы и переноса. Действие схемы проследим на примере сложения чисел 7 (в двоичной системе 0111) и 14 (в двоичной системе 1110):

$$\begin{array}{r} 7 \rightarrow 0\,111 \\ +\;14 \rightarrow 1\,110 \\ \hline 21 \leftarrow 10\,101 \end{array}$$

Числа в виде последовательности импульсов подаются на соответствующие входы Σ_1 последовательно, разряд за разрядом, начиная с младшего разряда. Рассмотрим состояние схемы в различные моменты времени.

В первый такт на вход *1* Σ_1 поступает импульс (1), на входе *2* Σ_1 импульс отсутствует (0). При этом на выходе *С* первого сумматора получаем импульс, который поступает на вход *1* сумматора Σ_2 и в результате второй сумматор дает на выходе *С* импульс. Во втором такте импульсы есть на обоих входах Σ_1, и первый сумматор выдает импульс на выходе *П*. Этот импульс проходит через линию задержки *ЛЗ* и попадет на вход Σ_2 лишь в третьем такте. Следовательно, во втором такте на обоих входах Σ_2 импульсы отсутствуют и на его выходе *С* импульса также не будет.

В третьем такте на оба входа Σ_1 снова поступают импульсы, дающие импульс на выходе *П* первого сумматора, который попадет на вход Σ_2 лишь в четвертом такте. В то же время за счет импульса на втором входе Σ_2, поступившего от второго такта, на выходе *С* Σ_2 в третьем такте получается импульс. В четвертом такте первый сумматор, на один из входов которого подается импульс, выдаст импульс на выходе *С*. Этот импульс попадет на вход *1* Σ_2, но от третьего такта через *ЛЗ* попадет также импульс на вход *2* Σ_2, в результате чего на выходе *С* импульса не будет, а импульс получится на выходе *П* Σ_2. Этот импульс в пятом такте, пройдя через *ЛЗ*, окажется на входе *2* Σ_2 и даст на выходе *С* Σ_2 импульс.

При помощи описанного сумматора на триггерах можно осуществлять поразрядное сложение чисел с любым количеством разрядов, причем время, затрачиваемое на сложение, равно количеству разрядов суммы.

3. УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Применяемые для хранения информации в машинах запоминающие устройства характеризуются такими основными показателями, как емкость, длительность и надежность сохранения информации, быстрота записи и считывания, габариты, стоимость и экономичность.

В машинах различают два вида «памяти»: оперативную, или внутреннюю, и длительную, или внешнюю. Первая непосредственно связана с арифметическим устройством и предназначается для хранения сравнительно ограниченной по объему информации, необходимой для ближайших вычислений. В современных машинах емкость оперативной памяти ограничивается несколькими тысячами чисел, причем основным предъявляемым к ней требованием является сокращение времени, необходимого для записи и считывания информации. Это время в применяемых и разрабатываемых машинах составляет единицы или десятки микросекунд.

Длительная, или внешняя, «память» предназначается для длительного хранения большого количества информации, измеряемой десятками или сотнями тысяч чисел. Поэтому внешние запоминающие устройства часто называют внешними накопителями. Они характеризуются значительно меньшей скоростью записи и выборки (считывания) информации и связываются с арифметическими устройствами, как правило, через оперативную память.

Рассмотрим различные конкретные запоминающие устройства (*ЗУ*), предназначенные для хранения информации. Запомним при этом, что, выражая числа в двоичной системе в виде единиц и нулей, мы можем записывать эти числа, применяя двухпозиционные технические устройства и считая, что заряженный конденсатор, намагниченный сердечник, притянутое реле, проводящая лампа и т. д. соответствуют записи единицы, а незаряженный или заряженный противоположным знаком конденсатор, ненамагниченный или противоположно намагниченный сердечник, отпущенное реле, запертая лампа соответствуют записи нуля.

Электромеханические и электронные реле. В первых образцах вычислительных устройств в качестве *ЗУ* широко применялись электромеханические реле. Однако такие *ЗУ* при ограниченной емкости (порядка сотен чисел) имеют довольно большие габариты, потребляют значительное количество электроэнергии и допускают относительно малые скорости записи и считывания, так как для срабатывания реле требуется время не меньше нескольких миллисекунд. Кроме того, наличие механических контактов резко ухудшает надежность таких *ЗУ*. Значительно более надежные и быстродействующие *ЗУ* могут быть построены на электронных триггерах — бесконтактных элементах со временем срабатывания, исчисляемым долями микросекунды. Однако *ЗУ* на триггерах также имеют относительно большие габариты, непрерывно потребляют электрический ток и поэтому применяются лишь в качестве малоемких оперативных *ЗУ*, рассчитанных на хранение одного или нескольких чисел.

Линии задержки. Запоминающие устройства на линиях задержки представляют собой одну из форм так называемой динамической памяти, при которой коды чисел в виде серий импульсов непрерывно циркулируют по замкнутой цепи (рис. 18). Линия задержки представляет собой электрическую систему, по которой импульсы распространяются с относительно малой скоростью v. Пусть линия задержки имеет длину l, тогда время распространения импульсов по ней будет $t=\frac{l}{v}$. Если подавать на линию задержки импульсы с частотой f, то общее количество импульсов, которые могут одновременно перемещаться вдоль линии задержки, будет равно $n=ft$. Вентили B_1, B_2 и B_3 играют роль переключателей, управляемых электрическим путем. Кодовые импульсы чисел вводятся на вход и, если на вентиль B_1 подано отпирающее напряжение, пропускаются этим вен-

тилем в линию задержки, проходят по ней, испытывая некоторое затухание, которое компенсируется усилителем *Ус*, проходят через вентиль B_2, нормально пропускающий импульсы, вновь поступают в линию задержки и т. д. При необходимости прочитать циркулирующее по системе число на вход «считывание» подается управляющее напряжение, которое отпирает нормально закрытый вентиль B_3, и импульсы ответвляются на выход системы, однако циркуляция их по системе продолжается. Для стирания записи подается напряжение на вход «стирание», причем вентиль B_2 запирается, циркуляция импульсов прекращается и *ЗУ* готово для записи новой информации.

В качестве линий задержки находят применение трубки, наполненные ртутью и закрытые с концов кристаллами пьезоэлектрика, например кварца. На вход трубки при этом подаются модулированные импульсами колебания вы-

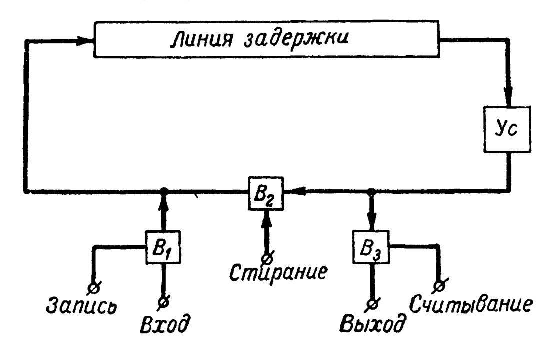


Рис. 18. Блок-схема запоминающего устройства на линии задержки.

сокой частоты, которые вызывают механические колебания кварца, передаваемые им ртути. Эти колебания распространяются по ртути со скоростью около 1 500 *м/сек*, передаются на выходе трубки кварцу, который вновь превращает их в электрические колебания, снова поступающие на вход трубки. На ртутной линии задержки длиной около 100 *см* практически удается хранить около 1 000 импульсов. Кроме ртутных линий задержки, в *ЗУ* могут применяться магнитострикционные линии, в которых используются колебания ферромагнитного стержня при его перемагничивании, пьезоэлектрические, электромагнитные, состоящие из индуктивностей и емкостей или сопротивлений и емкостей, волноводные и др. *ЗУ* на линиях задержки характеризуются большой надежностью работы, но недостатком их является то, что

считывание информации может происходить лишь в момент прохождения соответствующих сигналов мимо вентиля B_3, что замедляет выборку информации.

Электронно-лучевые ЗУ. Для хранения информации широко применяются электронно-лучевые трубки, напоминающие кинескопы. Существует несколько типов запоминающих электронно-лучевых трубок, однако общий принцип их работы можно описать следующим образом.

Запись информации происходит на диэлектрическом экране, в любое место которого луч может быть направлен соответствующим подбором напряжений на отклоняющих пластинах. Изменяя скорость потока электронов и напряжение на расположенной за диэлектрическим экраном сигнальной пластинке, можно, используя явление вторичной электронной эмиссии, сообщить любой точке экрана положительный или отрицательный электрический заряд. Приписывая, предположим, положительному заряду значение 1, а отрицательному — значение 0, можно записать на экране код числа. Для считывания информации нужно повторно направлять луч в соответствующие точки экрана, что обеспечивает при подаче соответствующего напряжения на сигнальную пластину получение импульсов в ее цепи. При считывании происходит одновременно и стирание записи. Поэтому если запись необходимо сохранить, то импульсы считывания вновь используются для возобновления записи на экране.

Такой же способ применяется и для длительного хранения информации: во избежание стирания ее вследствие постепенного стекания зарядов в схеме обеспечиваются периодическое стирание и новая запись информации. Обычно в каждой трубке хранится лишь один разряд числа, поэтому для записи *n*-разрядных чисел *ЗУ* должно содержать *n* трубок. На экране каждой трубки применяемых типов удается записать 1 024 или 2 048 единиц информации. Таким образом, если *ЗУ* состоит, скажем, из 20 трубок, то в нем одновременно может храниться 1 024 и 2 048 двадцатиразрядных чисел.

Запись и считывание информации в электронно-лучевых *ЗУ* происходит очень быстро: в единицы микросекунд, и в любой последовательности. Это выгодно отличает электронно-лучевые *ЗУ* от линий задержки, где нужно ждать момента прохождения нужной серии импульсов мимо вентиля считывания. Поэтому в течение нескольких лет память на электронно-лучевых трубках являлась основным видом

оперативной памяти в быстродействующих универсальных цифровых машинах. Однако недостатками такого *ЗУ* являются его относительная громоздкость и жесткие требования к стабильности напряжения источников питания. Поэтому в настоящее время оперативную память все чаще проектируют на магнитных сердечниках.

***ЗУ* на магнитных сердечниках.** Для изготовления *ЗУ* на магнитных сердечниках используются магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (рис. 19). Как видно из рисунка, при величине напряженности поля $+H_0$ индукция в магнитном материале достигает величины $+B_r$ и, если мы теперь будем уменьшать напряженность поля до нуля или даже создадим напряженность противоположного направления порядка $-\frac{H_0}{2}$ и более, индукция будет сохранять свое значение $+B_r$. Только при приближении величины напряженности к $-H_0$ происходит перемагничивание материала, индукция достигает величины $-B_r$ и для нового перемагничивания необходимо создать напряженность поля $+H_0$. Таким образом, материал с прямоугольной петлей гистерезиса характеризуется наличием как бы двух устойчивых состояний ($B=+B_r$ и $B=-B_r$), причем перевести материал из одного устойчивого состояния в другое можно, создавая напряженность поля $+H_0$ или $-H_0$.

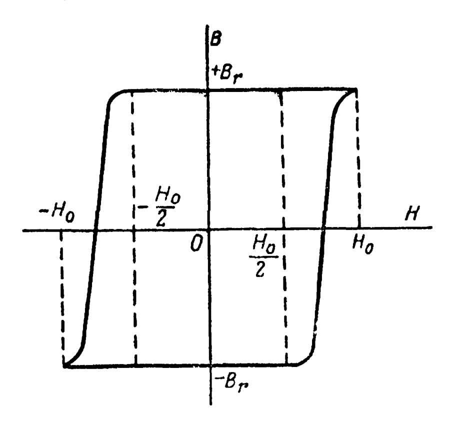


Рис. 19. Петля гистерезиса магнитного материала.

Из такого ферромагнитного материала изготовляют кольцевые сердечники, обеспечивающие хранение информации в форме двоичных знаков (0 или 1), соответствующих той или другой полярности магнитного состояния сердечников. На каждом сердечнике располагают три обмотки: две для записи и одну для считывания информации. Сердечники располагают в виде системы, состоящей из правильных горизонтальных и вертикальных рядов (рис. 20), причем каждый горизонтальный ряд служит для записи всех разрядов одного числа, а каждый вертикальный ряд для

записи одного из разрядов всех чисел. Таким образом, количество горизонтальных рядов определяет количество чисел, которое может храниться в *ЗУ*, а количество вертикальных рядов — максимальное количество разрядов в каждом числе.

Обмотки соединены между собой, как показано на рис. 20, по рядам, а все обмотки считывания составляют одну последовательную цепь. Величина тока, поступающего на входы X_1, X_2, ..., X_n и Y_1, Y_2, ..., Y_n равна $\frac{I_0}{2}$, где I_0 — величина тока, необходимая для создания перемагничивающей напряженности поля H_0. Таким образом, прохождение тока только по одной из обмоток сердечника не может изменить его магнитного состояния. Если же пропустить токи по обеим обмоткам так, чтобы создаваемые

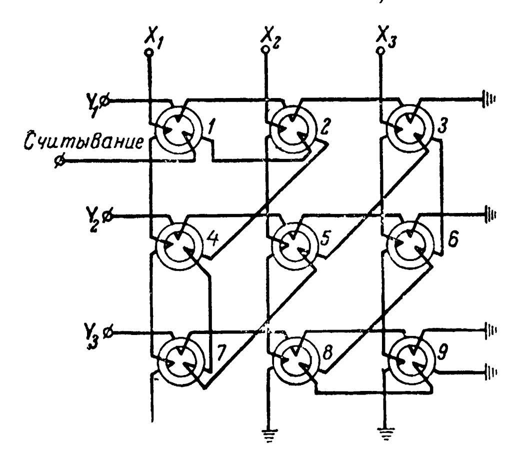


Рис. 20. Схема запоминающего устройства на кольцевых магнитных сердечниках.

ими напряженности поля складывались, то этим будет обеспечено надлежащее перемагничивание сердечника. Примем за начальное состояние отрицательную намагниченность всех сердечников, для создания которой нужно на входы всех вертикальных и горизонтальных рядов подать отрицательное напряжение.

Пусть мы хотим во втором горизонтальном ряду записать число 101. Подадим для этого на вход Y_2 положительное напряжение и на входы X_1 — положительное (1), X_2— отрицательное (0) и X_3 — положительное (1) напряжения. Тогда в сердечниках *4* и *6* будет создана положительная

напряженность, достаточная для их перемагничивания в состояние положительной намагниченности. Сердечник 5 остается в состоянии отрицательной намагниченности. В таком виде информация может храниться неограниченное время без всякой затраты энергии. Если теперь требуется прочитать записанное число, то на соответствующий горизонтальный вход (в нашем случае на вход Y_2) подается отрицательное напряжение, а на все вертикальные входы X_1, X_2, ..., X_i — отрицательные импульсы напряжения последовательно один за другим. При подаче импульса на вход X_1 произойдет перемагничивание сердечника 4, вследствие чего в считывающей обмотке индуктируется электродвижущая сила, которая создаст импульс на выходе считывания. Подача импульса на вход X_2 не вызовет перемагничивания сердечника 5, так как он был намагничен отрицательно, и на выходе мы не получим импульса; наконец, при подаче импульса на вход X_3 перемагнитится сердечник 6 и на выходе получим импульс.

Описанные устройства применяются в качестве быстродействующих *ЗУ* с емкостью порядка нескольких десятков тысяч чисел Время записи и считывания у них измеряется единицами микросекунд, причем возможна выборка чисел в произвольном порядке. Для удешевления устройства и упрощения его изготовления обмотки на сердечниках могут быть заменены просто проводниками, продетыми сквозь кольцевые сердечники, как показано на рис. 21.

Применение *ЗУ* на магнитных сердечниках благодаря простоте устройства, надежности, экономичности, малым габаритам и большой скорости записи и считывания имеет большие перспективы в будущем.

Ферроэлектрические *ЗУ* Еще более заманчивые перспективы сулит применение в *ЗУ* так называемых ферроэлектрических материалов (сегнетоэлектриков) с прямоугольной формой зависимости между напряженностью электрического поля и диэлектрической проницаемостью, напоминающей форму кривой гистерезиса (рис. 19). Наиболее подходящим из известных сегнетоэлектриков для применения в *ЗУ* является титанат бария, используемый в качестве диэлектрика в конденсаторах, заменяющих магнитные сердечники в местах пересечения шин *X*, *Y* (рис 20). *ЗУ* на ферроэлектриках потребляют ничтожную мощность, работают от низких напряжений порядка единиц вольт, отличаются большим быстродействием (для записи и считывания требуется время

порядка микросекунды) и малыми размерами. На пластинке площадью 1 *см*^{2} и толщиной в десятые доли миллиметра, удается записать до 2 000 двоичных знаков.

Магнитные ленты, барабаны и диски. Для хранения большого количества чисел в качестве внешнего *ЗУ* в машинах широко используется магнитная запись электрических импульсов по тому же принципу, что и запись звука на магнитофоне (рис. 22). При движении ленты на ней под действием магнитного поля, создаваемого записывающей

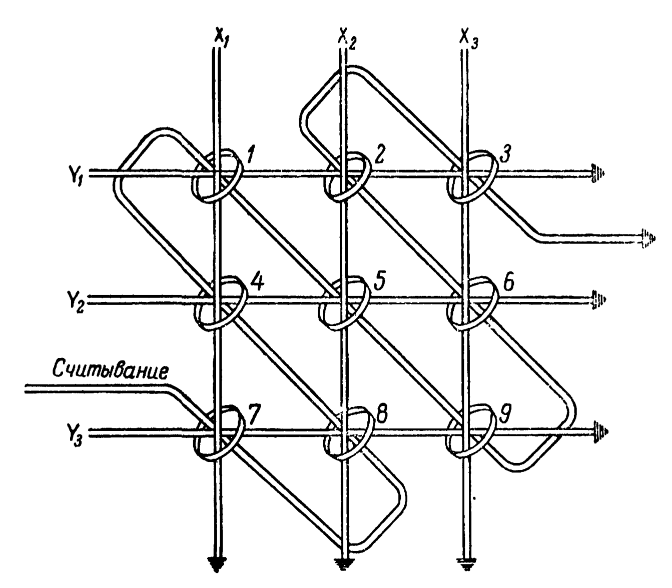


Рис. 21. Запоминающее устройство на кольцевых сердечниках с пронизывающими проводниками вместо обмоток.

головкой, создаются намагниченные участки — диполи. На сантиметре длины ленты удается записать в зависимости от конструкции головки от 4 до 30 диполей при ширине дорожек записи от 1 до 3 *мм*. В общем на одной ленте можно записать несколько десятков тысяч многоразрядных чисел. Для считывания может применяться та же головка, что и для записи: при прохождении мимо головки диполей, записанных на ленте, в ее обмотке индуктируются импульсы считывания. Недостатком *ЗУ* на магнитной ленте является относительно длительное ожидание при выборке нужного числа, что связано с необходимостью перемотки ленты. Этот

недостаток устраняется при хранении информации на магнитных барабанах (рис. 23). Барабан изготовляется из алюминия, на поверхности которого наносится ферромагнитный слой толщиной $0{,}01 \div 0{,}03$ *мм*. Записывающие и считывающие головки располагаются в ряд по образующим барабана. При работе барабан непрерывно вращается со скоростью до $6\,000 \div 7\,500$ *об/мин*. На одном барабане удается хранить несколько тысяч чисел. Так как путем надлежащего выбора головки любое место барабана оказывается доступным за один оборот, то время записи и считывания составляет около 10 *мсек*, т. е. значительно меньше, чем при записи на ленту. Однако габариты *ЗУ* на барабане много больше, так как внутренняя полость его совершенно не используется.

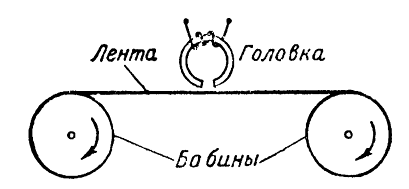


Рис. 22. Схема запоминающего устройства на магнитной ленте.

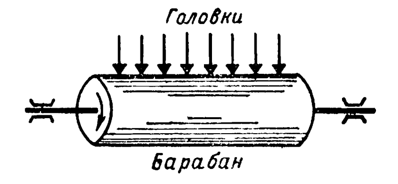


Рис. 23. Запоминающее устройство на магнитном барабане.

Для одной из последних моделей вычислительных машин (США) разработано *ЗУ* на 50 магнитных дисках, насаженных на непрерывно вращающуюся со скоростью 1 200 *об/мин* вертикальную ось (рис. 24). Расстояние между дисками составляет около 8 *мм*, что позволяет подводить головки к любой из 100 концентрических дорожек, расположенных на каждой из двух сторон диска. Общая емкость такого устройства достигает несколько сот тысяч чисел, запись и выборка которых могут производиться в любой последовательности в течение времени, необходимого для того, чтобы подвести головку к нужной дорожке, т. е. порядка долей секунды.

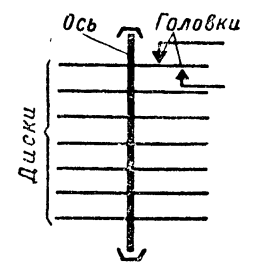


Рис. 4. Запоминающее устройство на магнитных дисках.

Описанные способы магнитной записи информации обладают существенными достоинствами: большой емкостью, простотой устройства, высокой надежностью, возможностью

считывания информации без ее стирания, возможностью сколь угодно длительного хранения информации без реставрации ее и при отключенных источниках питания. К недостаткам магнитной записи относятся наличие механических движений, а следовательно и изнашиваемости деталей, необходимость точного соблюдения скоростей вращения и точности величины магнитных зазоров, а также относительно большое время записи и считывания. Тем не менее магнитная запись в настоящее время является основным видом длительной памяти машин.

4. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Арифметические устройства электронных цифровых машин предназначаются для выполнения сложения чисел, выраженных в двоичной системе сложения. В § 2 настоящей главы был описан сумматор, построенный на триггерах. В современных машинах все большее распространение получают разнообразные арифметические устройства построенные на так называемых логических схемах. Рассмотрим три простейшие логические схемы: инвертора, совпадения и собирательную, используя которые, можно построить арифметические устройства.

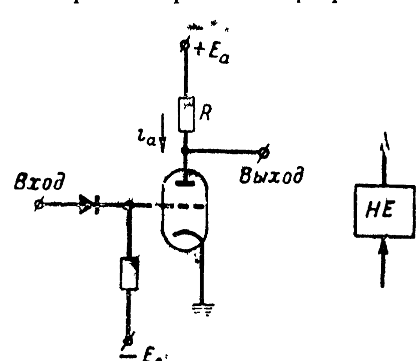


Рис. 25. Схема инвертора.

В схеме инвертора (рис. 25) на сетку триода подан большой отрицательный потенциал E_c, запирающий лампу. Анодный ток равен нулю, напряжение на сопротивлении R не падает и на выходе получается высокое напряжение E_a. При подаче на вход положительного потенциала лампа отпирается, и так как сопротивление R много больше сопротивления лампы постоянному току, напряжение на выходе становится весьма малым вследствие падения напряжения на R. Таким образом, при отсутствии сигнала на входе имеет место сигнал на выходе, и наоборот. В блок-схемах инвертор будем обозначать прямоугольником с надписью *НЕ*.

Схема совпадения (рис. 26) представляет собой многополюсник с любым количеством входов и одним выходом.

Если на все входы подать положительный сигнал, то все вентили будут заперты, ток через сопротивление R проходить не будет, на нем не будет создаваться падение напряжения и на выходе будет иметь место напряжение E_a. Если хотя бы на одном из входов положительный сигнал будет отсутствовать, то через соответствующий вентиль и сопротивление будет проходить ток, отчего напряжение на выходе станет весьма мало. Таким образом, сигнал на выходе схемы совпадения имеет место лишь, когда есть сигналы **и** на первом, **и** на втором, **и** на любом входе. В блок-схемах будем обозначать эту схему прямоугольником с надписью *И*.

Собирательная схема (рис. 27) дает положительный сигнал на выходе, когда есть положительный сигнал хотя бы на одном из входов. Другими словами, сигнал на выходе получается, когда есть сигнал **или** на первом, **или** на втором, **или** на любом из входов, **или** на нескольких входах одновременно в любой комбинации. В блок-схемах такая схема обозначается прямоугольником с надписью *ИЛИ*.

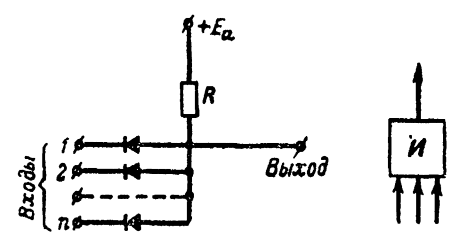


Рис. 26. Схема совпадения.

Мы рассмотрели по одному варианту логических схем *НЕ*, *И* и *ИЛИ*. Любая из этих трех логических функций может быть реализована при помощи большого количества вариантов различных схем, собранных на вакуумных и полупроводниковых диодах и триодах, а также и на других коммутационных элементах. В частности, за последние годы разработаны разнообразные логические схемы на ферромагнитных сердечниках, что позволяет строить вычислительные машины, совершенно не содержащие электронных приборов. Учитывая неограниченный срок службы ферромагнитных сердечников, возможность эксплуатации их при значительных колебаниях температуры, механическую прочность, малые габариты и другие преимущества, следует отметить, что создание безламповых машин на ферритовых сердечниках весьма перспективно.

На рис. 28 приведена схема одноразрядного сумматора последовательного действия на логических элементах. Слагаемые в виде электрических импульсов вводятся на входы *А* и *Б* сумматора, имеющего два выхода: *С* — сумма и *П* —

перенос в следующий разряд. Помня функции логических схем *НЕ*, *И* и *ИЛИ*, нетрудно проследить порядок работы этого сумматора, записанный в виде таблицы на рис. 28.

Для последовательного сложения многоразрядных чисел можно воспользоваться схемой рис. 17, уже рассмотренной нами ранее при использовании сумматоров на триггерах. В данном случае схема остается совершенно неизменной, только вместо сумматоров на триггерах мы можем использовать в ней сумматоры на логических элементах. Последовательное сложение многоразрядных чисел происходит за столько тактов, сколько разрядов имеют слагаемые. Для повышения скорости действия вычислительных машин можно применять более сложные схемы сумматоров, обеспечивающие одновременное сложение всех разрядов слагаемых. При этом сложение многоразрядных чисел осуществляется за один такт работы машины. Однако количество элементов в сумматорах и количество соединительных проводов с устройствами памяти при этом значительно увеличиваются, так как в арифметическое устройство должны одновременно вводиться все разряды слагаемых.

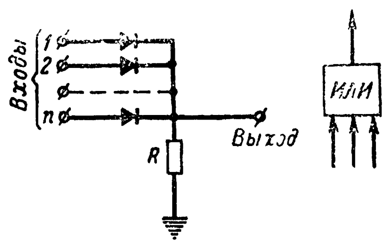
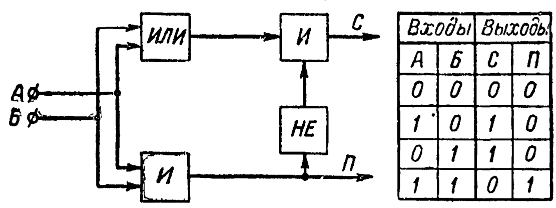


Рис. 27. Собирательная схема.



Входы		Выходы	
А	Б	С	П
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

Рис. 28. Схема одноразрядного сумматора последовательного действия на логических элементах.

5. УСТРОЙСТВА ВВОДА И ВЫВОДА

Связь машины с внешней средой осуществляется через специальные устройства для ввода и вывода данных — через входные и выходные устройства. Вводить в машину нужно исходные данные для вычислений, т. е. числа, и программу работы — описание тех действий, которые машина должна произвести над исходными данными. Как будет показано в следующем параграфе, программа работы также кодируется системой чисел.

Таким образом, все что подлежит вводу в машину — это серия расположенных в определенном порядке чисел. Для этой цели применяется устройство с клавиатурой, подобной клавиатуре пишущей машинки. Однако при ударе по клавише цифра не печатается на бумаге, а происходит пробивание отверстий на специальных бумажных картах, на ленте или кинопленке. Перфорированные таким образом карты, лента или пленка представляют собой своеобразные запоминающие устройства, хранящие информацию, вводимую в машину. Для считывания информации может применяться либо механический способ ощупывания карты или ленты специальными щеточками, замыкающими при наличии отверстий электрическую цепь, либо более совершенный фотоэлектрический способ.

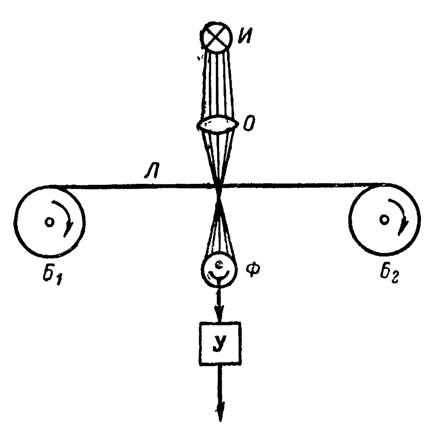


Рис. 29. Фотоэлектрический способ считывания информации при вводе данных в машину.

$Б_1$ и $Б_2$ — бобины; *Л* — перфорированная лента; *И* — источник света; *О* — оптическая линза; *Ф* — фотоэлемент; *У* — усилитель.

При фотоэлектрическом считывании (рис. 29) луч света от источника, сконцентрированный оптической линзой, проходит через отверстия (перфорации) в ленте и воздействует на фотоэлемент, который превращает посылки света в электрические импульсы, усиливаемые усилителем и поступающие затем в запоминающее устройство машины. Вывод данных из машины может осуществляться также при помощи перфорированной ленты, электромеханического или фотопечатающего устройства. Печатание результатов вычислений происходит в общепринятой десятичной системе счисления, для чего в выходном устройстве имеются специальные дешифраторы, при помощи которых происходит перевод чисел из двоичной в десятичную систему.

6. ТИПЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ МАШИН И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Познакомимся теперь с некоторыми конкретными типами электронных цифровых машин, спроектированных и построенных в нашей стране.

Наиболее широко известна созданная в начале пятидесятых годов в Институте точной механики и вычислительной техники Академии наук СССР под руководством академика С. А. Лебедева машина БЭСМ — быстродействующая электронная счетная машина. Эта большая универсальная машина содержит около 5 000 электронных ламп, размещается в зале площадью около 150 *м*², потребляет до 100 *квт* электроэнергии. Машина выполняет до 10 тысяч арифметических операций в секунду с числами, содержащими девять десятичных знаков. Следовательно, она может считать миллиарды с точностью до единицы или единицы с точностью до одной миллиардной. БЭСМ — машина параллельного действия. Ее арифметическое устройство выполнено на электронных реле (триггерных ячейках). Оперативная память работала на электронно-лучевых трубках, которые в начале 1957 года заменены магнитной памятью на ферритовых сердечниках

Внешняя память машины осуществлена в виде записи на магнитной ленте (120 тысяч чисел) и на магнитном барабане (около 5 тысяч чисел).

Ввод данных в машину осуществляется со скоростью около 20 чисел в секунду при помощи бумажной перфоленты с фотоэлектрическим считыванием. Вывод результатов вычислений производится с помощью фотопечатающего устройства на кинопленку со скоростью 200 чисел в секунду и со значительно меньшей скоростью — при помощи электромеханического печатного устройства. За несколько лет эксплуатации на машине БЭСМ решено огромное количество задач из различных областей науки и техники. Так; например, на ней для Международного астрономического календаря за несколько дней произведена колоссальная работа по вычислению орбит движения семисот малых планет солнечной системы с учетом сил притяжения их Юпитером и Сатурном.

На машине составлено большое количество различных математических таблиц, определялись наиболее выгодные профили откосов гидротехнических сооружений, обрабатывались данные геодезической съемки и, наконец, выполнялись пробные переводы с английского языка на русский, а также осуществлялось решение шахматных задач.

Машина выполняет работу десятков тысяч вычислителей и дает стране экономию, исчисляемую сотнями миллионов рублей. Несколько лет назад БЭСМ была одной из наиболее быстродействующих машин в Европе. Однако техника

быстро движется вперед и сейчас созданы машины, выполняющие несколько десятков тысяч арифметических операций в секунду, а проектируются машины, которые будут выполнять сотни тысяч операций в секунду.

Наряду с разработкой все более быстродействующих, но соответственно и более сложных и дорогих машин, широкое распространение получают более дешевые малогабаритные машины, доступные научно-исследовательским институтам, конструкторским бюро, крупным предприятиям. В 1956 году изготовлены первые экземпляры машины «Урал», предназначенной для серийного производства.

Эта машина содержит около 800 ламп, 3 000 германиевых диодов и потребляет мощность 8 *квт*. Для размещения машины нужна площадь около 40 $м^2$. Она работает со скоростью 100 операций в секунду, оперируя с числами, содержащими 35 двоичных разрядов. Основными элементами машины являются триггеры, инверторы, формирователи. Запоминающее устройство машины включает магнитный барабан с 1 024 ячейками и магнитную ленту емкостью до 40 000 ячеек. Для ввода данных в машину со скоростью 4 500 чисел в минуту применяется предварительно засвеченная перфорированная стандартная кинопленка, чтение с которой осуществляется с помощью германиевых фотодиодов. Печатание результатов вычислений производится на бумажной ленте со скоростью 100 чисел в минуту.

Нашей промышленностью изготовлено также несколько универсальных электронных цифровых машин «Стрела», работающих со скоростью 2 000 операций в секунду.

В 1956 году выпущены первые машины «Погода» и «Кристалл». Первая из них предназначена для бюро прогнозов погоды, где она должна обеспечить быструю переработку информации, поступающей от метеорологических станций, что позволит своевременно давать достаточно точные предсказания погоды.

«Кристалл» предназначается для производства трудоемких вычислительных операций, связанных с обработкой данных рентгеноструктурного анализа кристаллов.

Проектируется и строится ряд специализированных машин для управления производственными процессами, экономико-статистических расчетов, автоматизации формирования и вождения поездов и для других целей.

При создании новых машин конструкторы стремятся к уменьшению их габаритов, веса и снижению расходов на

питание за счет широкого внедрения полупроводниковых диодов и триодов, применения логических схем на ферритовых сердечниках, увеличения объема памяти при одновременном уменьшении размеров запоминающих устройств. Широкие перспективы в области создания запоминающих устройств с большим объемом памяти открываются в связи с возможностями использования для этой цели сегнетоэлектриков.

Скорости работы машин уже в ближайшее время достигнут нескольких сот тысяч операций в секунду, а скорости ввода данных — порядка тысяч знаков в секунду. Для постройки машин все чаще будут использоваться стандартные блоки, причем значительного снижения стоимости и уменьшения габаритов можно будет в дальнейшем добиться широким внедрением печатных схем.

После появления первых электронных цифровых машин прошло немногим более десяти лет. За такой короткий срок достигнуты огромные успехи в их конструировании и производстве. Это дает полное основание ожидать в течение ближайших лет новых поразительных достижений в стремительно развивающейся технике электронного машиностроения.

7. ПРИНЦИПЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ РАБОТЫ МАШИН

Решение подавляющего большинства математических задач сводится к выполнению простых арифметических действий. Для отыскания, например, корней квадратного уравнения $x^2+bx+c=0$ при известных значениях b и c мы, пользуясь формулой $x=-\frac{b}{2}\pm\sqrt{\frac{b^2}{4}-c}$ подставляем численные значения коэффициентов b и c и затем производим ряд таких операций, как деление, сложение, вычитание, возведение в степень, извлечение корня и т. д. Можно показать, что все эти операции в свою очередь можно выполнять как сложение и вычитание. Так, например, чтобы умножить число 50 на 10, достаточно взять число 50 слагаемым 10 раз. Следовательно, умножение сводится к многократному сложению. Разделить число 20 на 5 можно путем ряда последовательных вычитаний делителя из делимого: 1) 20—5=15; 2) 15—5=10; 3) 10—5=5; 4) 5—5=0. После получения нуля нужно подсчитать, сколько раз производилось вычитание (в нашем случае 4 раза), и это число является частным, т. е. результатом деления. Возведение в степень

есть умножение числа самого на себя, а умножение, как мы уже показали, сводится к сложению и т. д.

Более того, само вычитание можно свести к сложению при соответствующем преобразовании кодов чисел. Это особенно удобно делается в двоичной системе счисления, что позволяет использовать в арифметическом устройстве вычислительных машин в качестве универсального прибора рассмотренный нами ранее сумматор.

Возможность сведения достаточно сложной задачи к определенному конечному числу шагов простых арифметических действий позволяет решать эту задачу любому человеку, не вникая в сущность задачи, даже не понимая ее, если только другой человек — квалифицированный математик составит подробную инструкцию — описание способа решения этой задачи. Например, мы можем, совершенно не зная, что такое степень, правильно найти результат $5^3 = 125$, если будем знать, что следует 5 умножить на 5 и еще раз умножить на 5. Такая система формальных правил, позволяющая чисто автоматически, не вникая в суть дела, правильно решать все задачи некоторого определенного типа, называется алгоритмом решения этих задач. Значит, составляя алгоритм данной задачи, мы делаем доступным человеку чисто механическое решение этой задачи, а если мы сумеем заставить в соответствии с составленным алгоритмом работать машину, то и машина также правильно решит эту задачу. Процесс решения задачи по алгоритму сводится к выполнению конечной цепочки элементарных арифметических и логических операций.

Описание последовательности этих операций вводится в машину в виде так называемой программы, состоящей из серии последовательно выполняемых команд. Каждая команда служит для выполнения какой-нибудь одной арифметической или логической операции. Широкое распространение получила система трехадресных команд, содержание которых имеет вид табл. 3.

Таблица 3

Осуществить операцию с номером	Над числами, взятыми из ячеек памяти с адресами		Результат отправить в ячейку с адресом
	I	II	III
01	21	27	34

Все операции (сложение, вычитание, умножение и т. д.) в машинах также кодируются определенными числами. Пусть в нашей машине приняты следующие коды операций: сложение 01, вычитание 02, умножение 03; печатание результата 07 и т. д. Тогда команда табл. 3 расшифровывается следующим образом: сложить числа, записанные в 21-й и 27-й ячейках памяти, и результат сложения записать в 34-й ячейке памяти.

Приведем пример программирования какой-либо несложной задачи. Пусть, например, нужно вычислить выражение

$$(A+B)(C-D).$$

Пусть исходные данные для вычисления, т. е. значения A, B, C и D, помещены соответственно в 22-й, 29-й, 36-й и 40-й ячейках памяти.

Программа решения задачи будет иметь вид, представленный в табл. 4.

Таблица 4

Код операции	Адреса ячеек памяти		
	I	II	III
01	22	29	31
02	36	40	34
03	31	34	50
07	50	—	—

В результате выполнения первой команды (первой строки таблицы) в 31-ю ячейку памяти будет помещена сумма $A+B$. После выполнения второй команды в 34-ю ячейку памяти попадет разность $C-D$. После третьей команды в 50-й ячейке памяти окажется результат $(A+B)(C-D)$, который будет отпечатан после выполнения четвертой команды.

Программа решения достаточно сложной задачи может состоять из очень большого количества команд. Учитывая, однако, возможность выполнения машиной десятков тысяч операций в секунду, оказывается, что машина может даже сложные задачи решать в очень короткие промежутки времени.

Важными особенностями программирования электронных вычислительных машин являются возможности циклического повторения отдельных участков программы с новыми исходными данными, наличие команд условного перехода,

при которых машина в зависимости от полученных результатов либо возвращается к повторению вычислений, либо переходит к выполнению следующей команды, либо останавливается и т. д. Все эти особые приемы программирования позволяют при сравнительно небольшой программе выполнять большой объем вычислений, автоматически изменять ход вычислительного процесса в зависимости от полученных промежуточных результатов вычислений и самой машине вырабатывать себе программу дальнейшей работы, основываясь на общих исходных принципах программирования.

Составление программ является довольно трудоемким процессом, и в настоящее время математики работают над решением задач автоматического программирования, т. е. задач составления программ работы вычислительных машин на самих же вычислительных машинах

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

1. УПРАВЛЯЮЩИЕ МАШИНЫ

Электронные вычислительные машины и в том числе цифровые машины, как показывает само название, предназначаются для производства вычислений, т. е. для операций с числами. Однако в настоящее время они получают все более широкое применение для решения неарифметических задач, в частности для автоматического управления производственными процессами, военной техникой, движением транспорта. Возможность выполнения машинами управляющих функций заключается в возможности описания тех или иных процессов математическими уравнениями, решение которых и можно поручать вычислительной машине.

Рассмотрим, например, функции, выполняемые машинистом электровоза, ведущего поезд. Машинист знает расписание движения, профиль пути, вес поезда, технические возможности электровоза. Он наблюдает за состоянием пути, за сигналами автоблокировки, учитывает атмосферные условия, фактическое выполнение расписания, т. е. идет ли он с опережением или запаздывает В соответствии с этой разнообразной информацией, перерабатывая ее, машинист решает задачу наиболее целесообразного управления электровозом. Эту задачу он решает приблизительно, пользуясь

своими техническими знаниями, производственным опытом, инструкцией. Однако при приблизительном решении задачи управления последнее осуществляется часто далеко не наилучшим способом. В самом деле, на одном и том же участке при одинаковых условиях хороший машинист может сэкономить электроэнергию, а худший — перерасходовать. Но даже и хороший машинист не всегда принимает наилучшие решения, так как у него зачастую отсутствует время для обдумывания этого решения, а, кроме того, и опыт и инструкция еще не дают гарантии того, что принятое решение действительно является наилучшим. Между тем задача выбора наилучшего режима управления электровозом может быть математически решена совершенно точно. Если воспользоваться уравнением движения поезда и подставить в него в качестве коэффициентов соответствующие данные (вес поезда, профиль пути, скорость и другие), то, решая это уравнение, можно получить точный ответ о том, когда нужно ускорить или замедлить движение, с какой силой осуществлять торможение и т. д. Однако машинист, даже если бы он и обладал соответствующей математической подготовкой, не может заниматься этими расчетами из-за недостатка времени.

Из соображений безопасности движения машинист должен быстро реагировать на изменение внешних условий, даже если эта быстрота идет до некоторой степени в ущерб точности выбора наилучшего режима управления электровозом.

Применение электронной управляющей машины, сочетающей возможность точного решения уравнения движения поезда с огромным быстродействием, обеспечивающим получение таких точных решений за время, исчисляемое секундами, позволяет ей управлять движением поезда лучше, чем это делает машинист, снижать таким образом расход электроэнергии и повышать безопасность движения. Такие же преимущества — более высокую точность управления, быстроту реакции и, наконец, возможность работы в таких местах, где человек находиться не может (в условиях сильных радиоактивных излучений, в управляемых снарядах, при космических полетах и т. д.), — дает применение кибернетических машин для управления самыми разнообразными процессами. При этом, как правило, используются общие принципы автоматического программного управления сложными процессами, иллюстрируемые рис. 6 и описанные в § 2 главы 1 Рассмотрим более подробно некоторые кон-

кретные случаи применения электронных машин для целей управления.

Управление металлообрабатывающими станками. Одним из видов автоматизации управления станками без применения электронных вычислительных машин является система автоматической обработки изделий по копиру. Копир представляет собой деталь, управляющую относительным движением заготовки и обрабатывающего инструмента при обработке на так называемых копировальных, чаще всего копировально-фрезерных станках. По копиру движется ощупывающий его профиль ролик или штифт, управляющие в свою очередь движением инструмента и заготовки. Изготовление хорошего копира требует высокой точности и является довольно трудоемкой операцией.

Применение электронной цифровой машины позволяет заменить копировальное устройство таким устройством, в котором профиль обрабатываемого изделия задан системой чисел, записанной в кодированном виде на перфорированной бумажной ленте, фотопленке или магнитной ленте. В таком виде информация о требуемой форме изготовляемого изделия поступает в электронное цифровое устройство, выполняющее соответствующие вычисления и вырабатывающее команды для управления станком. Эти команды в виде импульсов напряжения или в преобразованном в непрерывные значения напряжения виде поступают в три исполнительных органа системы, обеспечивающих, скажем, перемещение фрезы на нужные величины вдоль трех осей координат.

Описанным в литературе примером использования принципа автоматического управления является устройство для автоматизации вертикально-фрезерного станка, предназначенного для изготовления небольших партий авиационных деталей с предельными размерами 1 500×750×700 *мм*. Устройство содержит 250 электронных ламп и 175 электромеханических реле.

В принципе при автоматизации станков вычислительную машину можно ставить вне цеха, причем она может управлять одновременно работой нескольких станков.

Применение электронных цифровых управляющих машин повышает производительность труда и снижает себестоимость продукции благодаря сокращению времени наладки станков, уменьшению затрат квалифицированного труда, повышению точности обработки и увеличению производительности оборудования. Однако пока еще подобные устрой-

ства представляют собой единичные опытные образцы, хотя несомненно, что в будущем они найдут широкое применение в рамках общей комплексной автоматизации производства.

Полная автоматизация предприятий с непрерывными производственными процессами. Развитие электронной цифровой техники позволяет подойти к решению вопроса полной автоматизации сложных производственных объектов: конвейеров, цехов, целых заводов. Эта задача легче всего может быть осуществлена на предприятиях с непрерывными (а не штучными или прерывистыми) производственными процессами, например на различных химических и нефтеперерабатывающих предприятиях.

Возможный при этом принцип автоматического управления иллюстрируется схемой рис. 30. Пусть сырье в процессе переработки проходит ряд этапов технологического процесса $Э_1$, $Э_2$, $Э_3$ и т. д. Управление каждым этапом осуще-

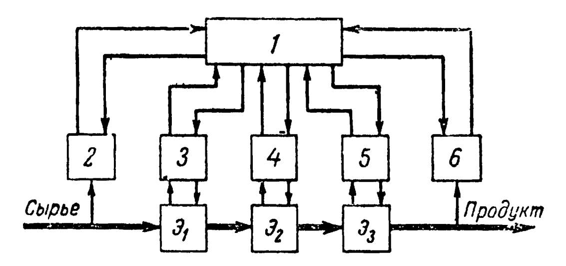


Рис. 30. Блок-схема автоматического управления предприятием с непрерывным технологическим процессом.

1 — центральная электронная вычислительная машина; *2* — анализатор сырья; *3*, *4*, *5* — местные регуляторы этапов процесса; *6* — анализатор готового продукта; $Э_1$, $Э_2$, $Э_3$ — этапы технологического процесса.

ствляется одним из местных регуляторов *3*, *4*, *5*, представляющим собой электронную цифровую машину, которой задана программа регулировки данного этапа процесса. Местные регуляторы имеют по два канала связи (прямой и обратный) как с агрегатами, осуществляющими этапы технологического процесса, так и с центральной электронной вычислительной машиной. Последняя получает от местных регуляторов информацию о ходе процесса по этапам и от анализаторов *2* и *6* — данные результатов анализа исходного сырья и готового продукта. Сравнивая результаты анализа готового продукта с техническими требованиями, предъявляемыми к нему, и перерабатывая всю остальную поступающую информацию, центральная электронная вычислительная машина, как бы выполняющая роль «диспетче-

ра» предприятия, вносит необходимые коррективы в программы работы местных регуляторов. Это приводит к таким изменениям течения этапов технологического процесса, которые обеспечивают получение продукта необходимого качества.

В качестве центральной электронной машины целесообразно применять машину, которая в процессе управления может находить наилучшие режимы работы предприятия. Для этого в ее памяти должны содержаться определенные оценки хода управления по той или иной программе и должна предусматриваться возможность автоматического перехода к другой более выгодной программе работы.

Уже сейчас существуют полностью автоматизированные хлебозаводы, на которых кибернетическая техника позволяет по заданным рецептам автоматически составлять из нужных составляющих и в требуемых пропорциях тесто, управлять его выпечкой и выпускать разнообразные готовые изделия. На таких заводах существует автоматическая система, обрабатывающая статистические данные о весе выпускаемых изделий и автоматически корректирующая дозировку теста. Это позволило значительно уменьшить перерасход теста и в то же время уменьшить отклонения веса изделий от нормы.

На одном из экспериментальных заводов Форда (США), который выпускает в день 4 600 шестицилиндровых блоков для моторов автомобилей, благодаря широкому внедрению автоматизации весь обслуживающий персонал состоит из нескольких человек в смене.

В направлении полной автоматизации предприятий пока сделаны лишь первые единичные шаги. Однако можно с уверенностью сказать, что в будущем применение для этой цели электронных машин позволит значительно повысить точность и оперативность управления, а следовательно, и улучшить основные технические и экономические показатели производства. Весьма большое будущее предстоит и машинам-«диспетчерам» в автоматизированных энергосистемах и в будущей единой высоковольтной сети Советского Союза.

Применение кибернетической техники на транспорте. В начале настоящего параграфа нами была рассмотрена идея устройства для автоматического вождения локомотива. Эта идея положена в основу разработанной в Советском Союзе и построенной в виде макета машины, получившей название «автомашиниста». Она полностью построена на

магнитных логических элементах и полупроводниковых вентилях и не содержит ни одной лампы, если не считать кенотронов в источниках питания. Первый образец автомашиниста предназначен для автоматического вождения электросекций пригородных поездов. В дальнейшем предполагается разработка машин для автоматизации управления электровозами и тепловозами.

Другой макет вычислительной машины, также собранный на магнитных элементах, предназначен для автоматизации процесса формирования поездов на так называемых сортировочных горках крупных железнодорожных станций. Состав, подлежащий сортировке, надвигается вагонами вперед на горку, где производится расцепка. Перевалив через вершину горки, вагоны под действием силы тяжести катятся вниз по наклонной части горки, причем в зависимости от того, куда следует груз, вагон при помощи стрелок направляется на один из путей так называемого подгорочного парка, где формируются поезда в различные направления.

Для того чтобы вагон не ударился сильно об уже стоящие на подгорочных путях вагоны, его нужно затормозить. Торможение на немеханизированных горках осуществляется подкладыванием под колеса специальных тормозных башмаков, а на механизированных горках — вагонными замедлителями, представляющими собой тормозные шины, расположенные по обе стороны рельсов, зажимающие бандажи колес. Управление вагонными замедлителями производится оператором с поста управления. Однако, так как различные вагоны (груженые и порожние, с хорошими или плохими подшипниками) развивают различную скорость и обладают разной энергией, а также учитывая, что в зависимости от заполнения подгорочных путей они должны пробежать различное расстояние, торможение их должно осуществляться с различной интенсивностью, определяемой оператором на глаз, неточно. Поэтому одни вагоны останавливаются раньше чем следует и их потом приходится подкатывать вручную или трактором, другие же ударяются об уже остановившиеся вагоны, что приводит к их повреждениям.

Заменой оператора электронной машиной можно добиться резкого улучшения работы сортировочной горки. Специальное радиолокационное устройство, использующее так называемый эффект Допплера, непрерывно измеряет скорость скатывающегося с горки вагона и таким образом определяет его ходовые свойства, обусловленные весом и качеством подшипников. Другое электрическое устрой-

ство определяет расстояние до ближайших стоящих на подгорочных путях вагонов. Вся эта информация поступает в электронную вычислительную машину, которая решает динамическую задачу, с какой скоростью вагон должен выйти из замедлителя, чтобы он остановился в заданном месте, и соответственно управляет торможением в замедлителях.

С применением электронных вычислительных машин могут быть созданы системы автоматического управления движением поездов на целых диспетчерских участках, устройства для автоматической продажи билетов на дальние расстояния, в том числе и с пересадками, с автоматическим гашением занятых мест и т. д.

Разработана модель автострады с автоматическим управлением движения по ней автомашин без шоферов, причем предусматривается автоматический обгон медленно идущих машин, въезды и выезды на автостраду.

Существуют на автострадах автоматические радиолокационные измерители скорости проходящих машин, которые в случае превышения разрешенной скорости автоматически включают фотокамеру, фиксирующую на пленку номер машины. Таким образом, в конце рабочего дня регулировщику остается по автоматически же проявленной пленке лишь выписать и разослать нарушителям штрафные квитанции.

Несколько лет на 120 перекрестках наиболее оживленной части Нью-Йорка работает автомат, регулирующий уличное движение значительно лучше и точнее, чем это делали полисмены-регулировщики. В него вводится информация о количестве скапливающихся в каждом направлении машин, поступающая от специальных счетчиков с фотоэлементами или подвесных радиолокаторов, о времени ожидания первого автомобиля, наконец, о загрузке соседних перекрестков. Применение этой системы позволило сократить 360 полисменов и уменьшить на полчаса время разъезда в часы «пик».

Могут применяться кибернетические устройства и для автоматического вождения по заданной программе кораблей и автоматического пилотирования самолетов.

Кибернетическая техника в военном деле. Возможность создания самоуправляемых, действующих без участия человека, устройств, естественно, привлекает большое внимание специалистов, работающих в области военной техники. Сама кибернетика зародилась в годы второй мировой войны и возникла для удовлетворения нужд войны. За истекший

после войны период техника электронных вычислительных машин сделала огромные успехи. Трудно перечислить все возможные применения их, поэтому мы укажем лишь некоторые основные области военного дела, где уже сейчас используются или проектируются системы, включающие электронную вычислительную технику.

Прежде всего машины широко применяются для производства весьма трудоемких аэродинамических, баллистических (т. е. связанных с определением траектории полета снарядов) и других расчетов. Огромное быстродействие машин позволяет рассчитать точную траекторию снаряда за время меньшее, чем время самого полета снаряда.

Одним из наиболее распространенных применений кибернетических устройств в военном деле являются системы автоматического управления огнем зенитной и корабельной артиллерии, объединяющие радиолокационную станцию, обнаруживающую самолет на расстоянии, и электронное вычислительное устройство, которое по данным, поступающим от радиолокатора, вычисляет дальнейший путь самолета и вырабатывает команды для устройства, которое наводит орудие и управляет автоматической стрельбой.

В американской печати сообщалось о разработанной в США единой полуавтоматической системе противовоздушной обороны. В этой системе информация от большого количества радиолокаторов дальнего обнаружения поступает в центральную электронную вычислительную машину, в «памяти» которой имеются данные о наличии средств противовоздушной обороны и истребительной авиации. Машина решает тактическую задачу наилучшего распределения этих средств и через «подчиненные» ей вычислительные устройства управляет автоматическим открытием огня зенитной артиллерии, катапультированием самолетов-истребителей, запуском управляемых снарядов.

Большие перспективы имеет создание на базе кибернетических машин систем автоматического управления полетом самолетов. Так, например, еще в 1952—1953 годах в США была испытана в десятках вылетов система «Диджитак», предназначенная для автоматического управления полетом бомбардировщика и бомбометанием. Система позволяет средствами радионавигации определять местоположение самолета, вычислять курс самолета к заданной цели и автоматически обеспечивать этот курс; по координатам цели, высоте и скорости полета и метеорологическим данным определить точку, где самолет должен сбросить бомбы,

и автоматически управлять самим бомбометанием. Электронная машина системы содержала 260 ламп и 1 300 германиевых диодов. Потребляемая мощность, включая расход энергии на охлаждение, составляла 1 300 *вт*. Объем всей системы «Диджитак», включая электронную машину, источники питания, приемное и измерительное устройства, охлаждение и переходное устройство для связи с автопилотом самолета, составлял около 0,3 *м*³ при весе порядка 100 *кг*. В настоящее время существуют значительно более экономичные, легкие и малогабаритные системы автоматического управления самолетами.

Существуют кибернетические системы, предназначенные для автоматического наведения на цель снарядов и мин, автоматического управления торпедными катерами и т. д.

Делаются, наконец, попытки применения машин для решения тактических и стратегических задач и планирования боевых операций.

2. МЕХАНИЗАЦИЯ ФОРМАЛЬНЫХ ВИДОВ УМСТВЕННОГО ТРУДА

Помимо решения задач вычислительного характера и применения в управляющих устройствах, кибернетические машины могут быть использованы для механизации ряда других видов умственной работы, поддающихся формализации, т. е. могущих быть осуществленными соответственно четким заранее установленным однозначным правилам. Примерами таких видов умственного труда являются учет, статистика, некоторые задачи планирования, перевод с одного языка на другой научных текстов и т. д. Не формальными видами умственного труда являются задачи творческого характера, например изобретательство, разработка новых научных теорий, литературное и музыкальное творчество и другие задачи, в которых, хотя и существуют некоторые общепринятые правила и нормы, существенную роль играют талант, вдохновение и интуиция человека-творца. Решение творческих задач недоступно машинам, формальные же процессы, для выполнения которых существуют четкие однозначные правила, могут осуществляться электронными машинами.

Такими задачами являются различные проектно-конструкторские работы, составление расписания занятий, графиков движения поездов на железных дорогах, планирование грузопотоков, составление расписания движения судов,

расписания полетов самолетов, обработка данных переписей, банковские расчеты.

Уже находит себе широкое применение механизация начисления зарплаты, всевозможных расчетов в страховом деле, учета реализации товаров в торговых предприятиях. Фирмой «Сильвания электрик» разработана машина для анализа данных, поступающих по проводам с 55 заводов, контор и складов фирмы. Машина хранит полученную информацию, анализирует данные и печатает результаты на скоростной автоматической пишущей машинке. Результатом ее работы является ускорение производственных расчетов, улучшение общего руководства, значительное уменьшение накладных расходов.

В лаборатории электромоделирования АН СССР спроектирована так называемая информационная машина с очень большим объемом «памяти», которая сможет очень быстро выдавать справки по различным отраслям знания и явится ценным помощником научного работника, инженера, конструктора.

Одним из наиболее интересных и сложных видов механизации формального умственного труда является автоматизация перевода с одного языка на другой.

Автоматический перевод. Первая публичная демонстрация машинного перевода состоялась на электронной машине ИБМ-701 в Нью-Йорке в январе 1954 года. В запоминающее устройство машины были введены русско-английский словарь из 250 слов и программа, которая содержала около 2 400 команд. Для перевода был подобран простой текст, состоящий из «известных» машине слов.

В 1955 году на машине БЭСМ были осуществлены опыты по переводу с английского языка на русский. Для этого в память машины был введен словарь из 952 английских и 1 073 русских слов. Среди английских слов 121 слово имело два различных значения, что указывалось в словаре при помощи специального кода. Об успешности этих опытов можно судить по следующей выдержке из статьи, напечатанной в одном из французских журналов за 1956 год.

«Прошлым летом, во время своего пребывания в России, члены американской делегации были приглашены на демонстрацию работы электронной машины, созданной советскими учеными. Опыт перевода с английского языка на русский показал, что русская машина оперирует со словарем свыше 1 000 слов и «составляет» фразы с гораздо большей точностью, чем американская машина

Известный Массачузетский технологический институт недавно организовал комитет, состоящий из пяти математиков и филологов, для того чтобы отыскать секрет русской электронной машины».

На самом деле, никаких особенных «секретов» у советской машины нет. Как сказано выше, опыты производились на универсальной машине БЭСМ, не предназначенной специально для перевода. Серьезных успехов при этом удалось добиться благодаря большой работе, проделанной советскими математиками и языковедами, разработавшими совершенные методы программирования перевода.

Попытаемся сжато изложить простейшие принципы работы машины при автоматическом переводе. Процесс работы переводчика, скажем при переводе с английского языка на русский, заключается в нахождении по памяти или в словаре достаточно точных русских эквивалентов английских слов, в разборе или анализе английского текста и, наконец, в правильном построении — синтезе — русского текста Наиболее простой задачей является нахождение русских слов, соответствующих английским. Пусть мы хотим перевести на русский язык английское слово *book* (книга). Для ввода английского текста в машину его нужно определенным образом закодировать, т. е. заменить числами, так как машина может оперировать только с числами. Обозначим букву *b* латинского алфавита через 06, букву *o* через 28 и букву *k* через 19. Тогда английскому слову *book* будет соответствовать число 06282819. Для ввода английского текста в машину применяется аппарат с клавиатурой пишущей машинки с латинским шрифтом. При ударе по клавише этот аппарат пробивает на бумажной ленте или перфорированной карте отверстия, соответствующие коду данной буквы. Затем лента подается на входное устройство, откуда числа, соответствующие английским словам в виде электрических импульсов попадают в машину.

В запоминающем устройстве машины хранится помещенный туда заранее словарь, в котором каждое английское и русское слово также заменено числом. Поиск нужного слова *book* заключается в сравнении методом вычитания выражающего его числа 06282819 со всеми числами словаря. При этом получится разность, равная нулю лишь тогда, когда искомое слово будет обнаружено. Учитывая, что машина может сделать, скажем, 10 000 вычитаний в секунду, приходим к выводу, что если даже искомое слово

стоит в конце словаря, то при объеме словаря в тысячу слов для нахождения слова понадобится 0,1 *сек.*

Однако таким образом можно перевести только однозначные слова, стоящие в начальной форме, и заменить все английские слова русскими в том же порядке, в каком они были расположены в английском тексте. Для грамотного же перевода реальных текстов требуется выбрать одно из многих возможных значений многозначного слова путем анализа окружающих его слов, проанализировать английский текст с точки зрения английской грамматики и грамотно построить русский перевод в соответствии с русской грамматикой. Все это требует чрезвычайно большой подготовительной работы по составлению достаточно совершенной программы работы машины. Программа должна быть введена в машину наряду со словарем заранее, причем большое количество правил и исключений из них требует весьма большой емкости запоминающих устройств, во много раз превышающей емкость, необходимую для хранения словаря.

В настоящее время в институте Точной механики и вычислительной техники Академии наук СССР и в Математическом институте имени Стеклова проводится весьма интенсивная работа по дальнейшему совершенствованию методов автоматического перевода. Результаты этой работы позволят в ближайшие годы перейти от опытов к практическому применению автоматических переводных машин. В первую очередь эта задача будет решена для перевода научных текстов, в которых, во-первых, количество слов ограничивается, как правило, несколькими тысячами и, во-вторых, построение предложений значительно точнее следует существующим правилам грамматики. Перевод художественной литературы затрудняется не только значительно более богатым словарем, но и тем, что в художественном произведении применяется значительно больше всевозможных идиоматических выражений. Однако главная трудность перевода художественных текстов состоит в том, что иногда даже формально правильный перевод оказывается весьма далеким по смыслу и по духу от оригинала, потому что переводчик художественного произведения должен не только хорошо знать язык, но должен знать и жизнь, быт, культуру и обычаи народа, с языка которого происходит перевод. А такого требования мы, конечно, машине предъявить не можем.

Хотя опыты перевода осуществлялись на обычных универсальных машинах, в дальнейшем для перевода будут

создаваться специализированные машины со значительно более емкими запоминающими устройствами, специальными наборами команд, с быстроработающими устройствами ввода и вывода.

Принципиально разрешены, но требуют еще большой практической разработки интереснейшие задачи непосредственного ввода в машину печатного текста: книги, газеты, журнала, с тем чтобы во входном устройстве происходило автоматически кодирование букв числами. Еще более сложной является задача непосредственного кодирования звуков человеческой речи. Все это задачи, которые будут решаться совместными усилиями математиков, языковедов, инженеров и физиков.

3. «ИГРАЮЩИЕ» МАШИНЫ

Большой интерес вызывают возможности применения кибернетических машин для оценки некоторой ситуации, например для оценки положения при игре в шашки или шахматы и для выбора одного из соответствующих данному положению разумных ходов. Задача эта не является однозначной. Например, нельзя указать наилучший ход, которым нужно начинать шахматную партию, так как нельзя заранее предвидеть течения игры, зависящего не только от нас, но и от нашего противника. Однако при любой ситуации можно указать несколько относительно хороших ходов и в то же время ряд заведомо плохих ходов, приводящих к потере фигур или резкому ухудшению их расстановки.

Для оценки позиции при автоматической игре в шахматы применяется численная оценка стоимости фигур и их расположения, например, по следующей шкале: король—200, ферзь—9, ладья—5, слон—3, конь—3, пешки: в обычных условиях — 1, отставшая — 0,5, изолированная — 0,4, сдвоенная—0,3, подвижность—0,1 (под подвижностью понимается количество свободных полей для передвижения наиболее сильных фигур). Общая ситуация оценивается разностью суммарных оценок обеих сторон. Хорошими ходами считаются такие, которые обеспечивают получение наибольшей положительной разности оценок в пользу играющего. При выборе хода машина перебирает множество возможных вариантов своих ходов и ответов противника на несколько ходов вперед. Практически сейчас машине удается при игре в шахматы просматривать все возможные варианты лишь на два-три хода вперед, ибо с увеличением количества ходов количество возможных вариантов растет настолько быстро, что даже при всем своем быстродействии

машина, просматривающая все возможные варианты, в том числе и совершенно нелепые с точки зрения шахматиста, попадет в жесточайший «цейтнот». Из сказанного ясно, что «видя» всего на два—три хода вперед, машина не может овладеть стратегией шахматной партии и, следовательно, «играет» весьма и весьма посредственно — на уровне начинающего шахматиста. Поэтому неверными являются некоторые появившиеся в зарубежной печати сообщения рекламного характера о том, что электронные машины обыгрывают в шахматы даже мастеров.

Значительно полезнее может быть машина в шахматном окончании, когда количество фигур на доске невелико и, таким образом, резко снижается количество возможных вариантов. Неплохо могут решаться на машине также двух-трехходовые задачи.

Хотя в настоящее время машинная игра в шахматы и не дает серьезных положительных результатов, однако интенсивная работа над ее программированием продолжается и привлекает серьезное внимание шахматистов и ученых. Дело в том, что методы, разработанные и проверенные для игры в шашки, шахматы и другие игры, могут быть использованы и для многих практических целей, таких, например, как планирование производственных процессов и военных операций.

4. «ОБУЧАЕМЫЕ» МАШИНЫ

За последние годы создан ряд машин, оформленных зачастую для занимательности в виде животных, которые способны как бы приобретать и накапливать некоторый «жизненный» опыт, как бы способны «обучаться». К таким машинам относятся «мышь в лабиринте», созданная одним из создателей теории информации Шенноном, «черепаха», разработанная крупным английским физиологом Уолтером, «белка» Беркли, «лисица» Дюкрока и др. Особенно популярны «мышь в лабиринте» и «черепаха», неоднократно повторенные с некоторыми изменениями различными конструкторами. В частности, в Институте автоматики и телемеханики Академии наук СССР В. Й. Ивановым сконструирован лабиринт для мыши, а Р. Р. Васильевым — макет «черепахи». Опишем коротко поведение «мыши» Шеннона и «черепахи» Уолтера в их первоначальных конструкциях.

«Мышь» представляет собой тележку с приводом, которую пускают в лабиринт из 25 квадратов (рис. 31), образуемый при помощи съемных перегородок. «Мышь» двигается по лабиринту ощупью, наталкиваясь на перегородки, и,

в конце концов, после длительных блужданий достигает «приманки» в виде специального контакта, помещенного в последнем квадрате лабиринта. Однако, будучи пущенной в лабиринт вторично, «мышь» движется к «приманке» по кратчайшему пути, не заходя ни в какие тупики, т. е. как бы «научившись» ориентироваться в лабиринте.

В действительности эта задача решается на основании относительно простой программы, введенной в машину. У «мыши» имеются два щупа-контакта: передний и левый. В соответствии с заданной программой мышь все время двигается прямолинейно, касаясь стенки левым щупом. При потере контакта она сворачивает налево и продолжает двигаться таким образом, пока не упрется в преграду передним щупом. Тогда она сворачивает направо, опять двигается, касаясь левым щупом стенки, и т. д. Ее путь фиксируется специальным релейным запоминающим устройством, и если она в какой-либо коридор входила и выходила, а это означает, что в нем нет «приманки», то при повторном опыте вход в этот коридор блокируется — запрещается.

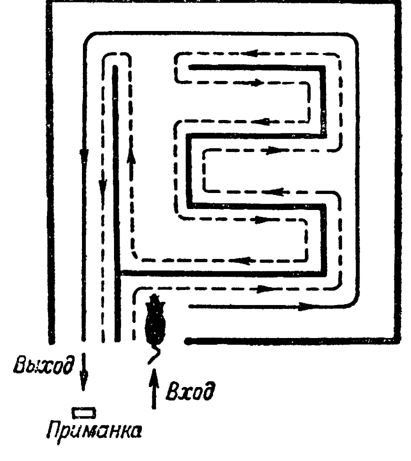


Рис. 31.

Описанная модель была создана Шенноном как прообраз предложенной Винером ускоренной системы соединений часто разговаривающих между собой абонентов автоматической телефонной станции.

«Черепаха» Уолтера моделирует некоторые черты поведения живого организма и представляет собой устройство на колесиках, заключенное в корпус, напоминающий по форме утюг. «Черепаха» снабжена аккумуляторной батареей, двумя электромоторами, один из которых сообщает ей поступательное, а второй — вращательное движение, и двумя приспособлениями, играющими роль «чувствительных органов» — рецепторов. Одним из рецепторов является фотоэлемент, реагирующий на источник света, вторым — специально сконструированный контакт, замыкающийся при встрече «черепахи» с препятствием или при движении ее по крутому

скату. Спереди «черепахи» расположена контрольная лампочка, сигнализирующая включенное состояние и в то же время исполняющая как бы роль фары.

Находясь в темноте, «черепаха» в поисках источника света двигается по сложной траектории, обследуя в час несколько десятков квадратных метров поверхности. При встрече с препятствиями она обходит тяжелые предметы и сталкивает со своего пути легкие препятствия. Она избегает движения по крутым уклонам и подъемам, стремясь выбирать для движения горизонтальную поверхность. При появлении в пределах «видимости» «черепахи» источника света она движется на него, однако если этот источник слишком ярок, то «ослепленная» «черепаха» отворачивается и начинает поиски другого, умеренно яркого источника. При встрече с зеркалом «черепаха» как бы узнает себя и двигается перед зеркалом по сложной траектории, то подходя к зеркалу, то удаляясь от него.

Если выпустить одновременно несколько «черепах», то при лобовом сближении они отворачиваются друг от друга и, разминувшись, продолжают движение При столкновениях «черепах», они реагируют одна на другую как на обычное препятствие. При появлении постороннего источника света все «черепахи» направляются к нему «толпой», расталкивая друг друга. Если осветить «клетку» «черепахи», то она заходит туда, причем если батарея нуждается в заряде, «черепаха» подключается к источнику зарядного тока и остается неподвижной до окончания заряда, после чего отключается, гасит за собой в клетке свет и вновь уходит на поиски.

Впоследствии устройство было еще усложнено для моделирования образования в живом организме условного рефлекса, причем в качестве безусловного раздражителя использовался свет, воспринимавшийся фотоэлементом, а как условный сопутствующий раздражитель — звук, воспринимавшийся микрофоном. Модель ведет себя следующим образом. Она всегда приходит в движение под действием света, движется, следовательно, и при одновременном воздействии света и звука и никак не реагирует на один только звук. Однако если повторить, скажем, десять опытов, одновременно «показывая» «черепахе» свет и издавая звук, то после этого «черепаха» будет приходить в движение уже и при одном только звуке. Но если затем в течение определенного времени или определенного количества

опытов не подкреплять звук светом, то образовавшаяся временная связь исчезнет, «условный рефлекс» угаснет.

Приведенное описание «поведения» «черепахи» может вызвать предположение об исключительной сложности ее схемы. Однако схема ее оказывается весьма простой, хотя простота эта была достигнута в результате долгих и настойчивых поисков наиболее целесообразного решения задачи.

Модели, подобные «черепахе», представляют интерес для инженеров, работающих в области автоматизации, как прообраз самонастраивающихся машин, приспосабливающихся к окружающей обстановке, и для физиологов как средство изучения некоторых процессов поведения живых организмов методами моделирования. Правда, описанные модели весьма примитивны и далеки от того, чтобы воспроизвести всю сложность процессов живого организма. Однако в дальнейшем могут быть созданы значительно более сложные модели, ближе воспроизводящие истинные физиологические процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная брошюра представляет собой попытку популярного изложения основных идей кибернетики вообще и технической кибернетики в частности. Кибернетика как молодое научное направление, насчитывающее всего около десяти лет существования, окончательно не оформилась, границы ее еще ясно не очерчены. До сих пор ведутся горячие споры, нужна ли такая наука, не следует ли удовлетвориться самостоятельным изучением вопросов автоматического регулирования, теории информации, электронных вычислительных машин, процессов в нервных системах. Однако сама жизнь, развитие техники автоматического управления, расширение областей применения электронных вычислительных машин требуют объединения творческих усилий математиков, инженеров, физиков и биологов, совместного рассмотрения как раз тех вопросов, которыми занимается кибернетика.

Конечно, кибернетику нельзя рассматривать как какую-то всеобъемлющую науку, стоящую над другими науками и способную объяснить все явления природы. Сам создатель кибернетики Н. Винер отнюдь не оценивает ее так высоко, как это делают отдельные его последователи за рубежом. Некоторые ученые и философы на Западе пытаются доказать универсальность электронных вычислительных ма-

шин, их неограниченные способности к решению любых задач, вплоть до планирования социального устройства человеческого общества. Высказываются бредовые идеи о том, что в будущем всесильные умные электронные машины превратятся в некую расу машин — господ и подчинят себе человечество, превратив людей в расу рабов. Развитие кибернетической техники буржуазная печать пытается использовать как средство против борьбы трудящихся за свои права, пугая рабочий класс и интеллигенцию возможностью организации полностью автоматизированного производства, в котором найдет себе место лишь ограниченное количество высококвалифицированных инженеров-конструкторов и наладчиков машин. Отсюда делаются выводы о неполноценности простого человека с тем, чтобы внушить ему идеи подчинения и покорности правящему классу буржуазии. Наконец, кибернетическую технику, как и любую другую отрасль науки и техники, империалисты стремятся поставить на службу войне.

Однако из всего сказанного совершенно не следует делать выводы о порочности самой кибернетики как науки, о недопустимости любых аналогий между машиной и живым организмом. Великий ученый И. П. Павлов в статье «Ответ физиолога психологам» писал: «Человек есть, конечно, система (грубее говоря — машина), как и всякая другая в природе, подчиняющаяся неизбежным и единым для всей природы законам; но система, в горизонте нашего современного научного видения, единственная по высочайшему саморегулированию». В последней части этого высказывания И. П. Павлов не исключает возможности по мере расширения горизонтов науки создавать системы, все более приближающиеся по своему совершенству к живым организмам.

Кибернетика как научное направление имеет определенные достижения, которые проверены высшим мерилом истинности — практикой. И если в идеологических рассуждениях сторонников кибернетики за рубежом имеются неправильные построения и делаются ложные выводы, то это не значит, что порочна вся кибернетика в целом.

В кибернетике нужно выделить и использовать ее подлинно научное содержание и отбросить все ложные идеологические наслоения.

Идея механизации умственного труда, освобождения человека от нудных, изо дня в день повторяющихся, стандартных процессов умственного труда так же прогрессивна,

как и освобождение человека от тяжелого физического труда, ибо это дает возможность человеку заниматься трудом, для которого он создан, — трудом творческим.

Угроза усиления безработицы за счет расширения использования кибернетических машин, реально существующая в капиталистическом обществе, не страшна для общества, организованного на плановых началах, где внедрение новой техники позволяет сокращать рабочий день, поднимать культурный и материальный уровень народа, ликвидировать противоположность между физическим и умственным трудом.

Конечно, никакая электронная машина никогда не сможет полностью заменить мозг человека, ибо она сама является продуктом, созданием человеческого мозга, и, следовательно, обязательно будет стоять по своей структуре и организации ниже мозга. Но в то же время электронная машина является исключительно могучим помощником мозга, неизмеримо расширяющим его возможности познания природы и овладения ее законами.

По поводу значения кибернетической техники академик А. Н. Несмеянов в одной из своих статей[1] писал: «Примером прорыва в следующий этаж науки и техники, в какой-то мере сопоставимым по перспективе с атомным прорывом, может служить создание электронных быстродействующих вычислительных машин».

И действительно, подобно тому, как атомная энергия, которая в условиях капиталистического строя может быть использована в разрушительных целях, даст в руки человеку коммунистического общества неисчислимые энергетические ресурсы, кибернетическая техника при ее планомерном использовании позволит человеку наиболее совершенным способом управлять этими ресурсами, все более подчиняя себе природу в интересах человеческого общества.

Огромным достижением советской науки и техники, открывающим новую эру в истории подчинения человеком природы, является впервые осуществленный в нашей стране запуск искусственных спутников Земли. Это достижение представляет собой ярчайший пример значения совместной работы ученых различных отраслей науки, создавших новые виды ракетного горючего, новые сплавы для корпусов ракет, осуществивших расчет полета ракет по заданной траектории и точный вывод спутника на свою орбиту.

---

[1] А. Н. Несмеянов, Наука и производство, „Коммунист", 1956, № 2, стр. 45.

Кибернетическая техника при этом сыграла весьма значительную роль. Электронные вычислительные машины позволили произвести сложнейшие вычисления, связанные с подготовкой к запуску спутников, а электронные управляющие устройства обеспечили автоматическое управление полетом ракет вплоть до вывода спутников на орбиту.

Широкое внедрение достижения кибернетики в научные исследования, в производство и управление, в технику транспорта и связи обеспечит еще более быстрое движение нашей страны по пути технического прогресса, по пути создания материальной базы коммунистического общества.

ЛИТЕРАТУРА

I. Популярная литература

Э. Кольман, Кибернетика, «Знание», 1956.

В. В. Солодовников, Некоторые черты кибернетики, «Знание», 1956.

Е. П. Попов, Автоматическое регулирование, Гостехиздат, 1956.

Р. А. Казарян, Б. И. Кувшинов и М. В. Назаров, Элементы общей теории связи, Госэнергоиздат, 1957.

Л. И. Гутенмахер, Электрическое моделирование, «Знание», 1955.

С. А. Лебедев, Электронные вычислительные машины, Изд. АН СССР, 1956.

Ф. В. Майоров, Электронные вычислительные машины, «Знание», 1955.

Д. Ю. Панов, Автоматический перевод, Изд. АН СССР, 1956.

Я. Г. Вараксин, Радиоэлектроника в военном деле, «Советское радио», 1956.

II. Литература для более подготовленных читателей

А. А. Харкевич, Очерки общей теории связи, Гостехиздат, 1955.

М. П. Долуханов, Введение в теорию передачи информации по электрическим каналам связи, Связьиздат, 1955.

Ф. В. Майоров, Электронные регуляторы, Гостехиздат, 1956.

Н. Е. Кобринский, Математические машины непрерывного действия, Гостехиздат, 1954.

А. И. Китов, Электронные цифровые машины, «Советское радио», 1956.

Цянь Сюэ-сэнь, Техническая кибернетика, Изд. иностранной литературы, 1956.

«Автоматы», Сборник статей под ред. К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти, Изд. иностранной литературы, 1956.

«Сессия Академии наук СССР по научным проблемам автоматизации производства», Изд. АН СССР, 1957.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 80 к.